

30-0386/001

~~XXV~~ 98/002

o. PROF. DR.-ING. GALLUS REHM · TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
LEHRSTUHL UND INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU

Untersuchungen

Über den Kohlensäureangriff auf Beton

B e r i c h t

erstattet von

Dipl.-Chem. Dieter Vollenschaar

September 1973

Die Arbeit wurde gefördert mit Hilfe von Forschungs-
mitteln des Landes Niedersachsen.

Postsendungen:
33 Braunschweig, Beethovenstraße 52
Fernschreiber: 9 52 598 lbsib d

Fernsprecher
3 91 22 80
Ortskennzahl 0531
Kommt keine Verbindung zustande,
bitte Nr. 3 91 22 81

Besuchzeiten:
Montag bis Freitag 8-17 Uhr

DK 547, 442 : 691 32

Inhaltsverzeichnis

Seite:

1. Einleitung	1
2. Stand der Erkenntnisse	1
3. Aufgabenstellung	4
4. Versuchsbedingungen	4
4.1 Versuchsaufbau	5
4.2 Versuchsdurchführung	7
5. Ermittlung geeigneter Analysenverfahren	9
5.1 Calciumbestimmung	9
5.2 Aluminiumbestimmung	11
5.3 Siliciumbestimmung	16
6. Herstellung der Probesubstanzen	20
6.1 Herstellung der Klinkerphasen	20
6.1.1 Tricalciumsilikat (C_3S)	20
6.1.2 Tricalciumaluminat (C_3A)	21
6.1.3 Dicalciumsilikat (C_2S)	22
6.1.4 Tetracalciumaluminatferrit (C_4AF)	22
6.2 Herstellung der Hydratphasen	23
6.2.1 Hydratation der Klinkerphasen	23
6.2.2 Hydrothermalsynthese	25
7. Versuchsergebnisse	26
7.1 Angriff auf die reinen Phasen	26
7.1.1 Tricalcium-Aluminat-Hexahydrat (C_3AH_6)	26
7.1.1.1 pH-Wert	26
7.1.1.2 Calcium	27
7.1.1.3 Aluminium	27

7.1.1.4 Röntgendiagramme	28
7.1.1.5 Angriff destillierten Wassers	28
7.1.2 Calcium-Silikat-Hydrat (CSHI)	29
7.1.2.1 pH-Wert	29
7.1.2.2 Calcium	30
7.1.2.3 Silicium	30
7.1.2.4 Röntgendiagramme	30
7.1.2.5 Angriff destillierten Wassers	31
7.2 Löslichkeitsverhalten von γ -Aluminiumhydroxid	31
7.3 Einfluß von Calciumhydroxid auf die Korrosion der Reinphasen	32
7.3.1 $C_3AH_6 + Ca(OH)_2$	32
7.3.1.1 pH-Wert	32
7.3.1.2 Calcium	33
7.3.1.3 Aluminium	33
7.3.1.4 Röntgendiagramm	33
7.3.2 CSHI + $Ca(OH)_2$	33
7.3.2.1 pH-Wert	34
7.3.2.2 Calcium	34
7.3.2.3 Silicium	34
7.3.2.4 Röntgendiagramm	35
7.4 Gegenseitige Beeinflussung von CSHI und C_3AH_6	35
7.4.1 pH-Wert	35
7.4.2 Calcium	35
7.4.3 Aluminium	36
7.4.4 Silicium	36
7.4.5 Röntgendiagramm	36
7.5 Korrosionsverhalten eines Modellzementes	37
7.5.1 pH-Wert	37
7.5.2 Calcium	37
7.5.3 Aluminium	37
7.5.4 Silicium	38
7.5.5 Röntgendiagramm	38

7.6 Korrosionsverhalten von hydratisiertem Portlandzement	38
7.6.1 pH-Wert	39
7.6.2 Calcium	39
7.6.3 Aluminium	39
7.6.4 Silicium	40
7.6.5 Röntgendiagramm	40
8. Auswertung	41
9. Zusammenfassung	45
10. Literaturverzeichnis	46
11. Anhang	49
(Tabellen und Abbildungen)	

1. Einleitung

Durch Korrosion werden jährlich Milliardenwerte vernichtet. Der Trend der Praxis geht daher heute dahin, durch Neufassung der entsprechenden DIN-Vorschriften und Zulassungsbedingungen ständig höhere Anforderungen an die chemische Widerstandsfähigkeit der einzelnen Baustoffe zu stellen.

Aufgabe der Ingenieure ist es, durch geeignete Maßnahmen einen sicheren Schutz der Bauwerke gegen vorzeitige Zerstörung vorzusehen. In früheren Jahren begnügte man sich mit passivem Korrosionsschutz, d.h. man sorgte durch geeignete Verfahren dafür, daß das korrodierende Medium von den zu schützenden Bauwerken ferngehalten wurde, im allgemeinen recht kostspielige Verfahren.

Um der stetigen Forderung nach höherer Wirtschaftlichkeit und steigender Lebensdauer sowie ständig schärfer werdenden Schutzbestimmungen gerecht zu werden, war es erforderlich, nach geeigneten aktiven Korrosionsschutzverfahren zu suchen.

Seit einer ganzen Reihe von Jahren befaßt man sich mit dem Angriff sulfathaltiger Wässer auf den Zementstein. Durch intensive Forschung ist es gelungen, den Angriffsmechanismus des Sulfations auf den Zementstein weitestgehend zu klären, was in der Folge zur Entwicklung sulfatbeständiger Zemente geführt hat.

Gleiche Erfolge bei der Entwicklung eines entsprechenden Spezialzementes für den aktiven Korrosionsschutz bei dem nicht minder häufigen Angriff kalkaggressiver, kohlenensäurehaltiger Wässer sind bisher nicht zu verzeichnen.

2. Stand der Erkenntnisse

Mit dem Verhalten von Beton in angreifenden Wässern befaßt man sich seit rund 70 Jahren. Dementsprechend zahlreich sind auch die Veröffentlichungen, die darüber erschienen sind. Eine Zusammenfassung bis zum Jahre 1968 gibt J. Biczok in seinem Buch "Betonkorrosion - Betonschutz" (1).

Aus der Vielfalt der komplexen Erscheinungen, die mit der Betonaggression verbunden sind und diese bestimmen, ist zunächst bei der Forschung nach deren Ursachen als wichtiger Ausgangspunkt der Aggressionsverlauf einwandfrei zu klären. Im Laufe der Jahre wurden zwar zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, doch liegen bisher nur unbefriedigende, sich zum Teil widersprechende Forschungsergebnisse vor, die für eine befriedigende Erklärung der tatsächlichen Ursachen nicht ausreichen.

Bei den im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführten Lagerungsversuchen, F.W. Locher (2), in kalklösender Kohlensäure wird zwar die deutliche Wirkung des lösenden Angriffs bei den mit verschiedenen Zementen hergestellten Prüfkörpern festgestellt, doch finden sich keine Angaben über die Zerstörungstiefe. In der Zusammenfassung stellt Locher fest, daß kalklösende Kohlensäure den Kalk aus dem Zementstein herauslöst, er macht jedoch keine Angaben über einen eventuellen Angriff auf Calciumsilikathydrate und eine dadurch aus Kieselsäure sich bildende Schutzschicht.

F. Gille (3) berichtet in seiner Arbeit über den Einfluß saurer Wässer, daß sich auf den Prüfwürfeln nach 8 Jahren weiche, kalkarme Schichten gebildet hatten, die zwar durch Bürsten entfernt werden konnten, gegenüber der in dem stark strömenden Wasser enthaltenen angreifenden Kohlensäure jedoch einen gewissen Schutz geboten hatten. Angaben über die chemische Zusammensetzung der weichen Schicht, ob es sich also eventuell um ein Kieselsäuregel oder Aluminiumhydroxid handelte, fehlen.

Versuche von G. Mall (4) haben ebenfalls ergeben, daß bei den Prüfprismen nur die Außenschicht von einigen mm Stärke von aggressiver Kohlensäure angegriffen wird. Auf Grund der Änderung des pH-Wertes während der Einlagerungszeit von 500 Tagen von 4,3 auf 6,3 schließt Mall eine Aufspaltung der Calciumsilikathydrate zu Calciumhydroxid und Kieselsäure aus. Nach seiner Ansicht wird ebenfalls nur der kohlensaure Kalk (CaCO_3) von der Kohlensäure angegriffen.

Im Gegensatz hierzu berichtet A. Steopoe (5) in seiner Arbeit über einen Angriff auch auf die Calciumhydrosilikate und -hydroaluminat, wobei durch Bildung von Calciumkarbonat letztlich Kieselsäure- und Aluminiumhydroxidgel zurückbleiben. Die gleichzeitige Wasserabspaltung durch die Einwirkung der Kohlensäure auf das Calciumhydroxid bewirkt nach seiner Ansicht eine Quellung der abgeschiedenen Gele, die somit, da ihre Säurelöslichkeit gegenüber den gebundenen Silikaten und Aluminaten herabgesetzt ist, eine Schutzwirkung gegen weiteren Angriff ausüben.

J. Biczok (1) zitiert außer Steopoe noch weitere Literatur (6), nach der die Kohlensäure auch die Calciumhydrosilikate und -aluminathydrate des Zementsteins angreift. Der Korrosionsvorgang der Kohlensäureeinwirkung schreitet danach also solange fort, bis sich letztlich durch Abscheiden der unlöslichen Kieselsäure und des Aluminiumhydroxids eine gelförmige Schutzschicht ausbildet, die den weiteren Angriff hemmt.

Beim Angriff von Meerwasser auf Beton aus granulierter Hochofenschlacke haben Sevieri und Guttman (7) festgestellt, daß im Laufe der Jahre Kalk herausgelöst wurde und sich Kieselsäuregele ausbilden, die durch Quellen dichtend wirkten. Ähnliche Beobachtungen wurden bei der Lagerung von Schlackensand auf der Halde gemacht: Die Teilchen umhüllen sich mit amorpher wasserhaltiger Kieselsäure oder Kalksilikatverbindungen. Die Entstehung dieser Gele führen die Verfasser auf die Einwirkung von Regen und Kohlensäure der Luft (!) zurück, welche die Oberfläche unter Abscheidung des Gels zersetzen (langsame Hydrolyse des Schlackensandes).

Nach Smolczyk (8) bestehen Schädigungen bei dichten Betonen, sofern es überhaupt zu einer Schädigung kommt, durch zementsteinlösenden Angriff schwach saurer, kohlensaurer und chemisch reiner Wässer lediglich in einem Aufräumen und allmählichem Auflösen von der Oberfläche her. Am schnellsten und vollständigsten wird das freie Calciumhydroxid des Zementsteins angegriffen, während die Calciumhydrosilikate nur langsam und unvollständig (?) reagieren, abhängig von der Art der angreifenden Säure. Angaben über Reaktionsmechanismen werden auch von Smolczyk nicht gemacht.

3. Aufgabenstellung

Aus der angeführten Literatur ist zu ersehen, daß bisher noch keine Klarheit über die Art des Angriffs von Kohlensäure auf Beton besteht.

Für einen quantitativen Schluß auf die Ursachen der Aggression ist es unerlässlich, genaue Aussagen über das Aggressionsverhalten in Abhängigkeit von den Bestandteilen des Zementes im Mörtelbett zu erhalten.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Aufklärung dieser komplexen Fragen liefern. Dabei wurde bewußt nicht von Zementen oder Modellzementen ausgegangen, da anzunehmen war, daß dadurch viel zu komplexe Tatbestände berührt und eine Klärung des Aggressionsverhaltens ungeheuer erschwert, wenn nicht sogar unmöglich gemacht werden würde. Ein der Aufgabenstellung besser gerecht werdendes Vorgehen war es dagegen, zuerst die Reaktionen der kalkaggressiven Kohlensäure mit den bekannten reinen Hydratationsprodukten der Zementsteinphasen, wobei auch hier eine Beschränkung auf die wichtigsten Komponenten der silikatischen und aluminatischen Phasen erfolgte, zu untersuchen und erst nach Klärung dieser Probleme die Untersuchungen auf Phasengemische und schließlich den Zement selbst auszudehnen.

4. Versuchsbedingungen

Das zunächst geplante Verfahren, kleine prismatische Probekörper mit plangeschliffener Oberfläche dem korrodierenden Angriff der kalkaggressiven Kohlensäure auszusetzen, wobei man durch Röntgenfeinstrukturaufnahmen der Oberfläche vor, während und nach dem Angriff direkt Veränderungen der Kristallphasen erfassen wollte, mußte aus zwei Gründen verworfen werden.

Erstens war der Korrosionsfortschritt, wie Vorversuche ergaben, nur sehr langsam. Zum anderen war die Oberfläche der Prismen mit einer gelförmigen, leider aber nicht planebenen Schicht aus Korrosionsprodukten bedeckt, die eine direkte Röntgen-

feinstrukturanalyse nicht zuließ. Eine röntgengerechte Aufarbeitung der Korrosionsprodukte zu einem Pulverpräparat war außerdem nur unter Schwierigkeiten möglich, da durch das erforderliche feine Aufmahlen der Stoffe sehr leicht eine Veränderung der einzelnen Phasen eintritt (9).

Um die Geschwindigkeit der aggressiven Reaktion zu erhöhen, ist eine Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen zu untersuchender Substanz und aggressiver Lösung erforderlich. Aus diesem Grunde wurden die Zementsteinphasen in Pulverform mit einer Korngröße $< 63 \mu\text{m}$ dem korrodierenden Angriff ausgesetzt. Damit liegen auch gleichzeitig die Reaktionsprodukte nach der Trocknung in feinkörniger, röntgengerechter Form zur Aufnahme von Pulverdiagrammen vor.

Da sich in Wasser nur eine begrenzte Menge Kohlendioxid zu lösen vermag (es löst sich bei 15°C in einem Liter Wasser 1 Liter CO_2) und von dieser Menge sich wiederum nur ca. 0,1 % mit dem Wasser zu Kohlensäure umsetzt, nimmt der Gehalt an kalkaggressiver Kohlensäure mit steigendem Calciumhydrogenkarbonatanteil in der Lösung ab. Zur Vermeidung einer derartigen Neutralisation durch den herausgelösten Kalkanteil und zur Aufrechterhaltung konstanter Korrosionsbedingungen wurde die kalkaggressive Kohlensäurelösung ständig erneuert.

Bei Übertragung dieser Versuchsbedingungen in die Praxis entspricht dieses einem Angriff durch kohlensäurehaltige, fließende Gewässer. Das Problem der Kohlensäurekorrosion stehender Wässer ist leichter zu lösen, da durch ausreichenden Calciumhydroxidanteil des Bindemittels alsbald eine Neutralisation der kalkaggressiven Kohlensäure erfolgt und, da letztere nicht erneuert wird, der zerstörende Angriff somit zum Stillstand kommt.

4.1 Versuchsaufbau

Das Reaktionsgefäß (Abb. 1) bestand aus einem doppelwandigen Glastiegel mit einer im Boden eingeschmolzenen Glasfritte, die einen maximalen Porendurchmesser von $16 \mu\text{m}$ aufwies. Die Einhaltung einer konstanten Versuchstemperatur wurde durch einen Umlaufthermostaten sichergestellt, der durch den Kühlmantel des Tiegels ständig auf 20°C temperiertes Wasser pumpte.

Versuchsapparatur

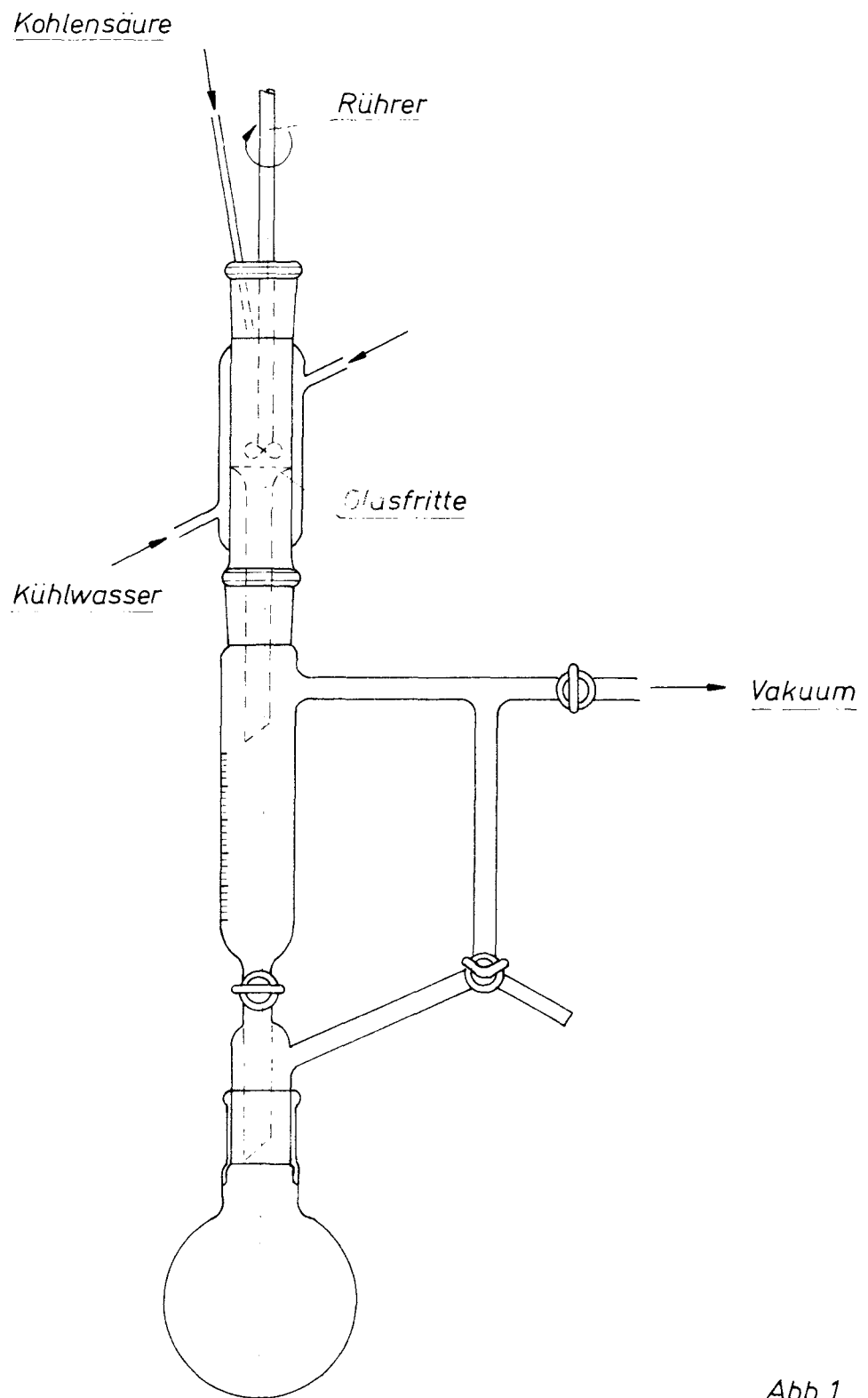


Abb. 1

Die vermittels des Umlaufthermostaten ebenfalls auf eine konstante Temperatur von 20° C temperierte kalkaggressive Kohlensäurelösung wurde kontinuierlich zugetropft.

Zur Aufrechterhaltung einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit wurde mit Hilfe einer Wasserstrahlpumpe ein Vakuum unterhalb der Glasfritte erzeugt. Um ein Verstopfen der Poren in der Glasfritte zu verhindern, wurde die Substanz durch einen Rührer ständig in der aggressiven Lösung bewegt. Die Strömungsgeschwindigkeit durch das Reaktionsgefäß betrug 50 ml/Stunde.

4.2 Durchführung

Die Durchführung der Versuche erfolgte in der Weise, daß auf das zu untersuchende feingemahlene Probematerial in dem Reaktionsgefäß kalkaggressive Kohlensäurelösung bestimmter Konzentration gegeben wurde.

Zur Bestimmung der Abhängigkeit der Korrosion der reinen Phasen von der Konzentration an kalkaggressiver Kohlensäure wurde letztere in den ersten Versuchsreihen variiert. Das erfolgte in der Weise, daß durch ein mit destilliertem Wasser gefülltes zylindrisches Glasgefäß laufend Kohlendioxid geleitet wurde. Auf diese Weise entstand eine gesättigte Kohlendioxidlösung. Durch Sättigung bei verschiedenen Temperaturen, die mit Hilfe eines Umlaufthermostaten eingestellt werden konnten, wurden so unterschiedliche Konzentrationen an kalkaggressiver Kohlensäure hergestellt, die dann nach Temperierung auf 20° C dem Reaktionsgefäß zugeführt wurden.

Für den Angriff auf die beiden reinen Phasen C_3AH_6 und CSH wurden Lösungen mit folgenden Gehalten an kalkaggressiver Kohlensäure hergestellt:

133 mg CO_2 /Liter, 178 mg CO_2 /Liter, 225 mg CO_2 /Liter und 278 mg CO_2 /Liter

Parallel zu diesen Versuchsreihen mit kalkaggressiver Kohlensäurelösung wurde der Angriff reinen destillierten Wassers auf die Reinphasen untersucht. Zweck dieser Versuche war es festzustellen, ob durch reines, destilliertes Wasser bereits eine Korrosion der Zementsteinphasen eintritt und falls dieses der Fall ist ein unterschiedlicher Korrosionsmechanismus in den beiden Fällen vorliegt.

Das Eluat wurde in Fraktionen zu je 50 ml aufgefangen - Vorversuche hatten ergeben, daß zur Kontrolle des Aggressionsverlaufs noch kleinere Fraktionsschritte nicht erforderlich waren - und in der Lösung der pH-Wert sowie der Gehalt an Calcium und Aluminium bzw. Calcium und Silicium bestimmt. Nach Durchsatz von 2,5 l kalkaggressiver Lösung = 50 Fraktionen wurde der Gewichtsverlust der Hydratphase bestimmt und der Rückstand mittels Röntgenfeinstrukturanalyse untersucht.

Die weiteren Versuchsreihen im Anschluß an die Untersuchungen der reinen Hydratphasen C_3AH_6 und CSH wurden dann mit einer konstanten Kohlensäurekonzentration durchgeführt. Da die Ergebnisse der Versuchsserien A und B keinen grundsätzlichen Unterschied im Angriff sondern nur eine graduelle Abstufung ergaben, wurde im folgenden mit einer konstanten Konzentration von 278 mg Kohlendioxid/l gearbeitet.

Diese Versuchsreihen sollten Aufschluß darüber geben, ob und in welcher Form die Hydratationsprodukte im Zementstein sich gegenseitig beim korrodierenden Angriff der Kohlensäure beeinflussen. So wurde zunächst der Einfluß von Calciumhydroxid auf das Korrosionsverhalten von C_3AH_6 und CSH und daran anschließend die gegenseitige Beeinflussung dieser beiden Phasen untersucht. Dabei wurden die Substanzen in einem Mengenverhältnis miteinander gemischt, das dem tatsächlichen Gewichtsverhältnis in einem normalen, vollständig hydratisierten Portlandzement entspricht.

Im Anschluß an diese Versuche wurde aus den drei Reinkomponenten C_3AH_6 , CSH und Calciumhydroxid ein Modellzement zusammengesetzt, der in analoger Weise dem Kohlensäureangriff ausgesetzt wurde.

Als Abschluß schließlich folgte eine Versuchsreihe, bei der eine Probe eines vollständig hydratisierten Portlandzementes in derselben Apparatur dem korro-
dierenden Angriff kalkaggressiver Kohlensäure ausgesetzt wurde.

Aus dem zu untersuchenden Zement, ein PZ 275 Teutonia, waren prismatische Probekörper $30 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$ hergestellt worden, die nach 28tägiger Wasserlagerung zwei Jahre in kohlensäurefreier Atmosphäre bei 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 63 % lagerten. Diese Probekörper wurden vorzerkleinert und dann in einer Achat-
kugelmühle unter n-Hexan und Schutzgas auf eine Korngröße $< 63 \mu\text{m}$ aufgemahlen. Dieses so gewonnene Zementsteinpulver wurde dann in der beschriebenen Versuchs-
apparatur eingesetzt.

5. Ermittlung geeigneter Analysenverfahren

Besondere Schwierigkeiten bereitete die Ermittlung geeigneter Analysenverfahren für die Bestimmung der ausgelösten Produkte. Zwar liegen eine große Anzahl Analysen-
methoden vor, doch war zu beachten, daß die Konzentration der zu bestimmenden Ele-
mente Calcium, Aluminium und Silicium im ppb-Bereich lagen und die meisten Analysen-
verfahren für diesen Konzentrationsbereich nicht brauchbar waren. Daher waren von
vornherein gravimetrische Methoden auszuschneiden. Einige photometrische Nachweis-
fahren (10/11) mußten ebenfalls ausgeschieden werden, da entgegen den Behauptungen
der Verfasser die nachzuweisenden Elemente sich gegenseitig störten.

5.1 Calciumbestimmung

Ein von Kosak und Balczó beschriebenes Verfahren (12) der chelatometrischen Titra-
tion von Calcium mit visueller Endpunktsanzeige erwies sich für das vorliegende
Problem als brauchbar.

Die in der Lösung vorhandenen störenden Aluminiumionen werden durch Zugabe von
Triäthanolamin maskiert.

Das Calcium wurde dann nach folgender geringfügig abgewandelter Vorschrift bestimmt.

Reagenzien:

Alle Reagenzien wurden in p.a.-Qualität verwendet, die Lösungen mit destilliertem Wasser bereitet.

- 1) Calconcarbonsäurelösung: 0,100 g der freien Säure "zur Metalltitration" in 25,0 g Methanol gelöst, wobei Bodenkörper zurückblieb.
- 2) 1 n Natronlauge
- 3) 0,01 m ÄDTA-Lösung
- 4) Triäthanolaminlösung: 30,0 g reines Produkt mit 70,0 g Äthanol gemischt
- 5) Spezial-Indikatorpapier: Merck pH 9,5 - 13,0

Arbeitsvorschrift:

Die auf einen pH-Wert von 4,0 - 4,5 eingestellte Probelösung wurde unter Umschwenken mit 1 ml Triäthanolaminlösung und 2 ml 1 n Natronlauge versetzt, so daß der pH-Wert zwischen 12,0 und 12,3 lag (pH-Papier). Sodann wurde mit 5 Tropfen Calconcarbonsäurelösung weinrot gefärbt und mit 0,01 m ÄDTA-Lösung bis zum Farbumschlag nach Reinblau titriert.

Berechnung:

1 ml 0,01 ÄDTA-Lösung entspricht 4,008 mg Calcium.

Sofern in der Lösung nur Siliciumionen neben den zu bestimmenden Calciumionen vorhanden sind, kann eine Maskierung unterbleiben. Die Titration kann dann nach folgender Vorschrift erfolgen.

Reagenzien:

- 1) Indikatorpuffertabletten, zur Wasserhärtebestimmung mit Titriplex-Lösungen, Merck

- 2) Ammoniaklösung. 25 %
- 3) 0,01 m ÄDTA-Lösung
- 4) Spezial-Indikatorpapier: Merck pH 9,5 - 13,0

Arbeitsvorschrift:

Für die Bestimmung von Calcium wird die schwach saure Probelösung mit einer Indikatorpuffertablette versetzt, durch Zugabe von 1 ml Ammoniaklösung auf einen pH-Wert zwischen 9 und 10 eingestellt und darauf sofort mit 0,01 m ÄDTA-Lösung bis zum Farbumschlag von rot auf grün titriert.

Auswertung:

1 ml 0,01 m ÄDTA-Lösung entspricht 4,008 mg Calcium

5.2 Aluminiumbestimmung

Die Bestimmung des Aluminiums erfolgte in Anlehnung an eine Vorschrift von Belcher, Crossland und Fennel (13), die Aluminium im Submikrobereich in organometallischen Verbindungen bestimmten.

Reagenzien:

- 1) Acetat-Puffer-Lösung: 30 g Natriumacetat-Trihydrat in 420 ml Wasser unter Zugabe von 60 ml 0,5 m Essigsäure gelöst
- 2) Oxin-Lösung: 0,25%ige Lösung von Oxin (8-Hydroxychinolin) in Chloroform
- 3) Aluminium-Standardlösung: 0,5669 g Aluminiummetall wurden in einigen ml Salzsäure gelöst und mit Wasser auf 1.000 ml aufgefüllt. Diese Lösung wurde nochmals 1 : 10 mit dest. Wasser verdünnt, so daß eine Standardlösung mit einem Aluminiumgehalt von 56,69 mg/l entstand. Je nach Anforderung wurde diese Standardlösung weiter verdünnt.

Arbeitsvorschrift:

20 ml der zu untersuchenden Lösung wurden durch Zugabe von 5 ml Pufferlösung auf einen pH-Wert von 5,2 gebracht. Dann wurden 10 ml Oxinlösung zugesetzt und das Gemisch in einem Scheidetrichter genau drei Minuten geschüttelt. Das gebildete Aluminiumoxinat geht bei diesem Ausschütteln quantitativ in die Chloroformphase über.

Nachdem sich organische und wässrige Phase getrennt hatten, wurde die gelblich gefärbte Chloroformphase durch einen im Auslauf des Scheidetrichters eingebrachten, als Filter wirkenden Wattebausch direkt in eine Spektralphotometerküvette abgelassen, die sofort mit einem Stopfen verschlossen wurde. Sodann wurde die Extinktion bei 395 nm gegen eine Blindlösung - destilliertes Wasser mit den gleichen Reagenzien versetzt - gemessen.

Auswertung:

Die Auswertung erfolgte an Hand einer Eichkurve, die auf entsprechende Weise mit Hilfe von Aluminiumstandardlösungen mit steigendem Aluminiumgehalt aufgenommen wurde.

Die Meßergebnisse sind in der Tabelle 1 zusammengestellt und in der Abb. 2 graphisch dargestellt. Zur Überprüfung, ob Calcium- oder Siliciumionen in der Lösung stören, wurden gleichzeitig entsprechende Meßreihen mit verschiedenen Calcium- und Siliciumgehalten durchgeführt (Tab. 2) .

Es zeigte sich, daß innerhalb der gewählten Konzentrationsbereiche eine lineare Abhängigkeit zwischen Extinktion und Aluminiumkonzentration bestand und ein Zusatz von Calcium und/oder Silicium nicht störten.

Tabelle 1

Aluminiumbestimmung mit 8-Hydroxychinolin

$\mu\text{g Al/100 ml}$	Extinktion bei 395 nm Schichtdicke 1,00 cm $t = 20^\circ \text{C}$	
	Einzelmessung	Mittel
5,669	0,040 0,044	0,042
11,338	0,061 0,060	0,060
28,345	0,159 0,157	0,158
56,690	0,321 0,319	0,320
85,035	0,487 0,489	0,488
113,380	0,650 0,651	0,651
141,725	0,810 0,811	0,811
170,070	0,964 0,963	0,964
198,415	1,14 1,14	1,14
226,760	1,29 1,29	1,29

Tabelle 2

Aluminiumbestimmung mit 8-Hydroxychinilin
 Extinktion in Abhängigkeit der Aluminiumkonzentration
 Beeinflussung durch Ca- und Si-Ionen

$\mu\text{g Al/100 ml}$	Extinktion bei 395 nm Schichtdicke 1,00 cm $t = 20^\circ \text{C}$					
	Calciumzusatz 10 mg/100 ml		Siliciumzusatz 5 mg/100 ml		Ca- u. Si-Zusatz 10 mg Ca/100 ml + 5 mg Si/100 ml	
	Einzelmessung	Mittel	Einzelmessung	Mittel	Einzelmessung	Mittel
5,669	0,040 0,039	0,040	0,044 0,041	0,042	0,043 0,040	0,041
11,338	0,059 0,058	0,059	0,061 0,060	0,061	0,063 0,063	0,063
28,345	0,158 0,157	0,158	0,160 0,156	0,158	0,160 0,161	0,161
56,690	0,320 0,319	0,320	0,322 0,320	0,321	0,317 0,321	0,319
85,035	0,489 0,491	0,490	0,489 0,489	0,489	0,488 0,487	0,488
113,380	0,651 0,648	0,650	0,653 0,652	0,653	0,650 0,650	0,650
141,725	0,810 0,810	0,810	0,810 0,810	0,810	0,814 0,808	0,811
170,070	0,962 0,964	0,963	0,965 0,965	0,965	0,965 0,963	0,964
198,415	1,13 1,14	1,14	1,15 1,14	1,15	1,14 1,13	1,14
226,760	1,29 1,30	1,30	1,30 1,29	1,30	1,29 1,29	1,29

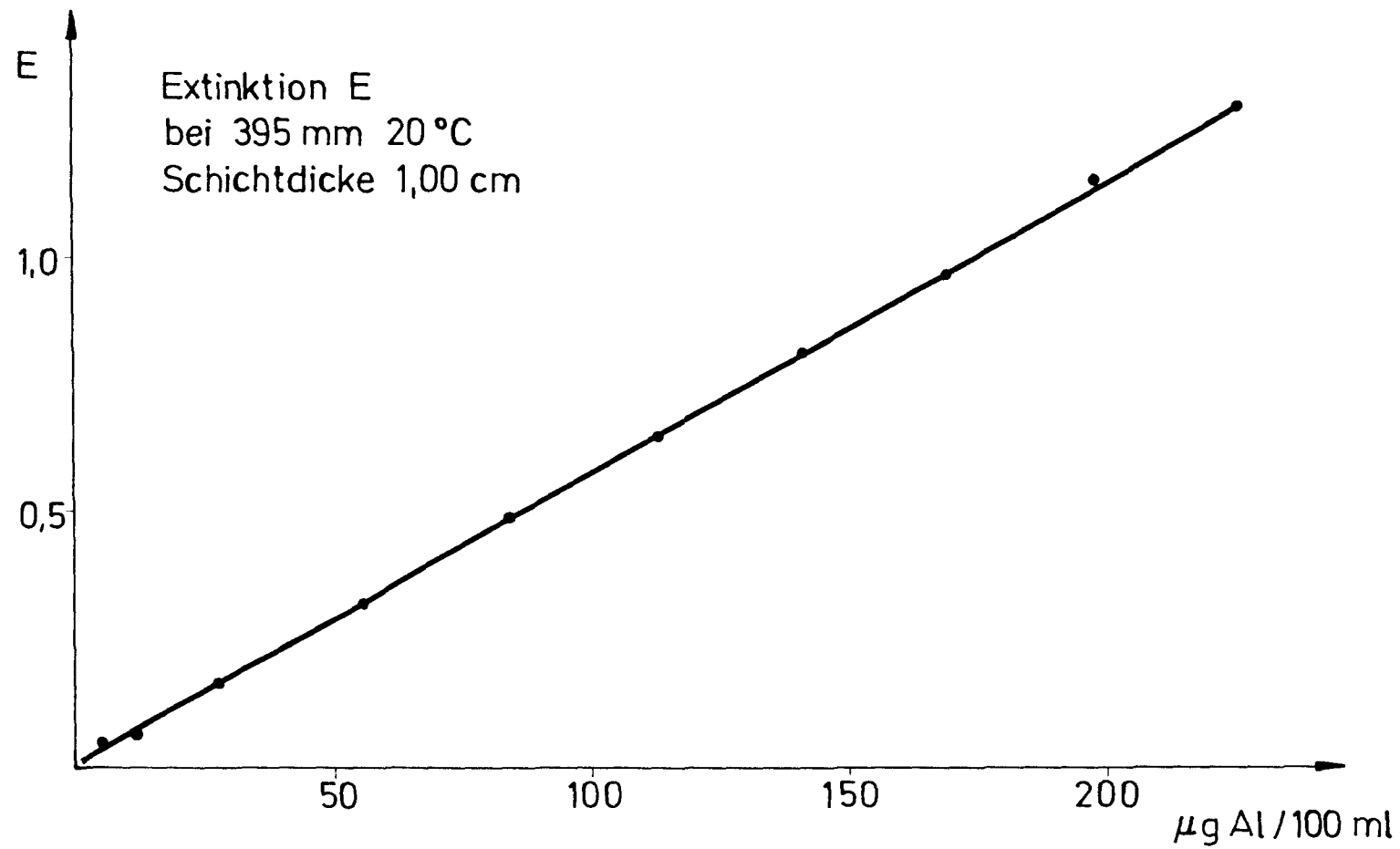


Abb: 2

5.3 Siliciumbestimmung

Zur Bestimmung des Siliciums wurde ein photometrisches Verfahren (14) gewählt. Eine Abtrennung von Aluminium und Calcium war nicht erforderlich, da keine störende Färbung durch diese Elemente auftrat.

Reagenzien:

1) Ammoniummolybdat-Lösung: 50 g Ammoniummolybdat gelöst in 50 ml Schwefelsäure ($d = 1,84$), die mit 900 ml Wasser verdünnt war. Lösung auf 1.000 ml aufgefüllt.

2) Oxalsäure 10%ig

Arbeitsvorschrift:

20 ml der zu untersuchenden Probelösung wurden mit 1 ml Ammoniummolybdat-Lösung versetzt und nach 10 Minuten 0,5 ml der Oxalsäure zugegeben. Sodann wurde die Extinktion gegen eine Blindlösung - Wasser plus Reagenzien - im Spektralphotometer bei 390 nm gemessen.

Auswertung:

Die Auswertung erfolgte mit Hilfe einer Eichkurve, die mit einer Siliciumstandardlösung ermittelt wurde. Die Meßergebnisse sind in der Tabelle 3 zusammengestellt und in Abb. 3 graphisch dargestellt.

Es ergab sich für den Meßbereich eine lineare Abhängigkeit der Extinktion von der Siliciumkonzentration, die auch durch Gehalte an Aluminium und Calcium, wie Testmessungen ergaben, nicht gestört wurde (Tab. 4).

Tabelle 3

Siliciumbestimmung mit Hilfe des
gelben Silicomolybdatkomplexes

mg Si/100 ml	Extinktion bei 390 nm Schichtdicke 1,00 cm t = 20° C	
	Einzelmessung	Mittel
0,2612	0,106 0,108	0,107
0,4364	0,185 0,183	0,184
0,5454	0,240 0,242	0,241
0,8727	0,385 0,384	0,385
1,0909	0,475 0,474	0,475
1,3091	0,545 0,550	0,548
1,5454	0,664 0,662	0,663
1,6363	0,705 0,706	0,706
2,1818	0,946 0,443	0,945

Tabelle 4

Siliciumbestimmung mit Hilfe des gelben Silicomolybdatkomplexes
 Extinktion in Abhängigkeit der Siliciumkonzentration
 Beeinflussung durch Ca- und Al-Ionen

mg Si/100 ml	Extinktion bei 390 nm Schichtdicke 1,00 cm $t = 20^{\circ} \text{ C}$					
	Calciumzusatz 10 mg/100 ml		Aluminiumzusatz 10 mg/100 ml		Ca- u. Al-Zusatz 10 mg Ca/100 ml + 10 mg Al/100 ml	
	Einzelmessung	Mittel	Einzelmessung	Mittel	Einzelmessung	Mittel
0,2612	0,107 0,107	0,107	0,103 0,108	0,105	0,106 0,106	0,106
0,4364	0,185 0,182	0,183	0,185 0,185	0,185	0,184 0,183	0,184
0,5454	0,240 0,237	0,239	0,241 0,239	0,240	0,240 0,237	0,239
0,8727	0,383 0,382	0,383	0,383 0,384	0,384	0,385 0,385	0,385
1,0909	0,475 0,478	0,476	0,476 0,476	0,476	0,478 0,476	0,477
1,3091	0,549 0,549	0,549	0,552 0,550	0,551	0,549 0,548	0,549
1,5454	0,665 0,662	0,664	0,663 0,662	0,663	0,662 0,662	0,662
1,6363	0,709 0,705	0,707	0,708 0,708	0,708	0,707 0,707	0,707
2,1818	0,944 0,944	0,944	0,943 0,940	0,942	0,945 0,942	0,944

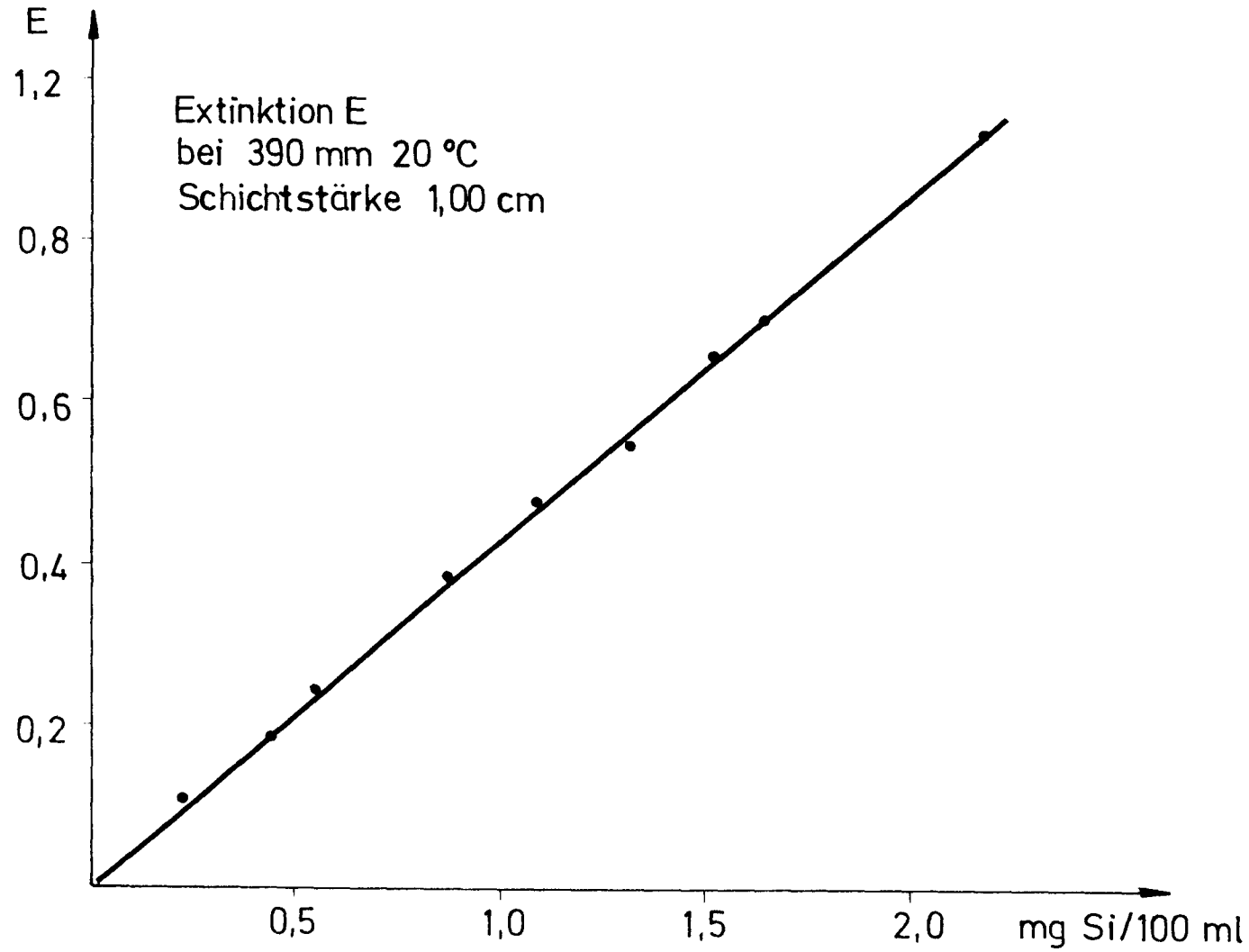


Abb: 3

6. Herstellung der Probesubstanzen

Vor Durchführung des Kohlensäureangriffs war es erforderlich, die zu untersuchenden Hydratphasen, d.h. Calciumsilikathydrat (CSH) und Calciumaluminathydrat (CAH) zu synthetisieren. Zur Darstellung dieser Substanzen wurden zwei Wege beschritten. Einmal wurde versucht, die Hydratphasen über die Herstellung der reinen Klinkerminerale (C_3S , β - C_2S , C_3A , C_4AF) und Hydratation derselben darzustellen, zum anderen wurden die Hydratphasen direkt auf dem Wege der Hydrothermalsynthese hergestellt.

6.1 Herstellung der Klinkerphasen

Als Ausgangsstoffe für die Klinkersynthese wurden Calciumcarbonat (Merck, p.a.), Aluminiumhydroxid (Merck, reinst), Kieselsäure ($SiO_2 \cdot xH_2O$, Merck, gefällt getrocknet) und Eisenoxyd (Fe_2O_3) p.a. Merck verwendet.

Alle Synthesen wurden durch Glühen von stöchiometrisch zusammengesetzten Mischungen der Ausgangsprodukte in einem Silitrohrofen durchgeführt. Das Glühen der Mischungen erfolgte in Platinschiffchen, wodurch Verunreinigungen mit Bestandteilen des Reaktionsgefäßes verhindert wurden.

Die erhaltenen Produkte wurden in einer Achat-Kugelmühle bis zu einer Korngröße $< 63 \mu m$ aufgemahlen und durch chemische und Röntgenbeugungsanalyse auf ihre Phasenzusammensetzung überprüft.

6.1.1 Tricalciumsilikat (C_3S)

Tricalciumsilikat wurde bereits verschiedentlich dargestellt (15, 16). Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich nicht wesentlich. In allen Fällen wurde das Ausgangsgemisch bei Temperaturen von 1.500° bis 1.700° C mehrmals gebrannt und zwischen den einzelnen Brennvorgängen jeweils fein aufgemahlen.

Bei unseren Untersuchungen wurde in Anlehnung an eine Arbeitsvorschrift des FDZ Düsseldorf (17) wie folgt verfahren.

Die unter Berücksichtigung des Glühverlustes im stöchiometrischen Verhältnis $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 3 : 1$ eingewogenen Ausgangssubstanzen wurden in einer Achatkugelmühle 1 Std. intensiv gemischt und anschließend durch ein Sieb nach DIN 4188 mit einer Maschenweite von 0,09 mm gesiebt. Durch Zufügen von wenig Wasser wurde eine teigige Suspension hergestellt, die in die Platinschiffchen eingegossen wurde. Anschließend wurde die Masse im Trockenschrank bei 110°C 2 Std. getrocknet. Das trockene Gemisch wurde dann in den Plattingefäßen im Rohrofen langsam auf 1.450°C aufgeheizt, 2 Std. bei dieser Temperatur geglüht und darann anschließend durch einen Luftstrom außerhalb des Ofens schnell auf Zimmertemperatur abgekühlt.

Die Substanz wurde anschließend in der Achatkugelmühle auf Analysenfeinheit zerkleinert und auf ihre Phasenzusammensetzung überprüft.

Das Röntgenbeugungsdiagramm enthielt nur die Reflexe des C_3S , die chemische Analyse sowie die Bestimmung des Freikalkgehaltes (18) ergab folgende Werte:

Freikalk	0,27 %
CaO	73,83 %
SiO_2	26,15 %

6.1.2 Tricalciumaluminat (C_3A)

Mischen und Trocknen der im stöchiometrischen Verhältnis $\text{CaO} : \text{Al}_2\text{O}_3 = 3 : 1$ zusammengesetzten Ausgangsmischung erfolgte in gleicher Weise wie beim C_3S . Gebrannt wurde das Substanzgemisch für 2 Std. bei 1350°C und das Produkt anschließend an Luft auf Zimmertemperatur abgekühlt.

Das in der Achatkugelmühle analysenfein aufgemahlene Reaktionsprodukt wurde wie beim C_3S auf Reinheit überprüft. Im Röntgenbeugungsdiagramm war außer den C_3A -

Reflexen andeutungsweise ein Reflex bei $4,85 \text{ \AA}$ enthalten. Dieser Reflex entspricht dem $C_{12}A_7$. Da diese geringen Mengen bei den durchzuführenden Untersuchungen sich nicht störend auswirkten, wurde auf eine Beseitigung dieser geringen Anteile $C_{12}A_7$ verzichtet.

Die chemische Analyse ergab folgende Werte:

Freikalk	0,18 %
CaO	62,20 %
Al_2O_3	37,72 %

6.1.3 β -Dicalciumsilikat (β - C_2S)

Der stöchiometrisch zusammengesetzten Ausgangsmischung, $CaO : SiO_2 = 2 : 1$, wurden 0,5 % Borsäureanhydrit (B_2O_3) zugesetzt, um beim Brennen die β -Modifikation des C_2S zu stabilisieren und beim Abkühlen eine Umwandlung in γ - C_2S zu verhindern. Mischen und homogenisieren erfolgte wie beim C_3S . Das vorgetrocknete Gemisch wurde sodann 1,5 Std. bei 1450° C im Rohofen gebrannt und anschließend rasch an Luft auf Zimmertemperatur abgekühlt. Nach dem Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse bestand das Reaktionsprodukt ausschließlich aus β - C_2S . Die quantitative chemische Analyse ergab folgende Werte:

Freikalk	0,08 %
CaO	65,15 %
SiO_2	34,82 %

6.1.4 Tetracalcium-Aluminatferrit (C_4AF)

Die Ausgangsmischung wurde stöchiometrisch aus den Reinsubstanzen $CaCO_3$, $Al(OH)_3$ und Fe_2O_3 entsprechend einem Verhältnis $CaO : Al_2O_3 : Fe_2O_3 = 4 : 1 : 1$ zusammengesetzt und wie bei den vorhergehenden Synthesen gemischt, homogenisiert und vorgetrocknet. Das Brennen erfolgte dann bei einer Temperatur von 1260° C . Nach einer

Brennzeit von 2 Std. wurden die Proben aus dem Ofen genommen und an Luft abgekühlt. Durch quantitative chemische Analyse sowie durch Röntgenbeugungsanalyse wurde geprüft, ob ausschließlich C_4AF bei der Synthese entstanden war. Röntgenographisch war außer C_4AF keine andere Phase nachzuweisen.

Die chemische Analyse ergab folgende Werte:

Freikalk	0,25 %
CaO	46,24 %
Al_2O_3	20,90 %
Fe_2O_3	32,84 %

6.2 Herstellung der Hydratphasen

6.2.1 Hydratation der Klinkerphasen

Über die Hydratation der Calciumsilikate und -aluminate liegen zahlreiche Veröffentlichungen der letzten Jahre vor. Die verwirrende Vielfalt der Ergebnisse, speziell für die Calciumsilikathydrate, erschwert jedoch eine Interpretation erheblich.

Für die vorliegenden Versuche wurde ein ähnliches Hydratationsverfahren gewählt, wie es von Schwiete (19) bei seinen Versuchen zur Bestimmung der Hydratationswärmen angewandt wurde.

Die Hydratation der einzelnen bis auf eine Feinheit $< 63 \mu m$ aufgemahlenen Klinkerphasen erfolgte mit einem Wasserüberschuß, Wasser-Klinker-Faktor = 20, bei Zimmertemperatur in Polyäthylenflaschen, um Verunreinigungen durch die Reaktionsgefäße zu vermeiden. Die Suspensionen wurden unter Fernhaltung der Luftkohlendensäure während der gesamten Reaktionszeit intensiv geschüttelt. Der Wasserüberschuß und die ständige Bewegung sollten den Reaktionsablauf beschleunigen. Der Reaktionsfortschritt wurde in konstanten Zeitabschnitten durch Röntgenfeinstrukturaufnahmen kontrolliert. Nach einer Hydratationszeit von 14 Tagen wurden die Suspensionen über einen Filtertiegel abfiltriert und der Filterrückstand im Vakuumexsikkator über P_2O_5 getrocknet.

Dabei wurde durch Arbeiten unter Schutzgas (Argon) Sorge dafür getragen, daß eine Karbonatisierung der Reaktionsprodukte nicht stattfinden konnte. Die getrockneten Produkte wurden anschließend röntgenographisch auf ihre Zusammensetzung untersucht. Dabei wurden folgende Ergebnisse erhalten:

C₃A: Nach einer Hydratationsdauer von 14 Tagen war praktisch das gesamte C₃A hydratisiert. Nach der Röntgenfeinstrukturanalyse lag fast ausschließlich C₃AH₆ vor. Lediglich andeutungsweise war im Diagramm der Hauptreflex des C₄AH₁₃ bei 8,2 Å vorhanden.
Die chemische Analyse ergab folgende Werte:

Glühverlust	27,8 %
CaO	43,5 %
Al ₂ O ₃	27,7 %

C₄AF: Auch diese Phase war nach 14 Tagen praktisch vollständig hydratisiert. Das Röntgendiagramm zeigte die gleichen Reflexe wie beim Reaktionsprodukt des C₃A, also C₃AH₆. Der im Vergleich zu dem Diagramm des Hydratationsproduktes von C₃A relativ hohe Untergrund deutete auf das Vorhandensein gelförmiger Reaktionsprodukte, vermutlich Calciumferrithydrate.

C₃S und β-C₂S:

Nach einer Reaktionsdauer von 14 Tagen war nahezu der gesamte Klinker unverändert vorhanden. Den einzigen Hinweis auf eine Hydratation gab das Vorhandensein von Calciumhydroxid.

Erst nach einer Reaktionsdauer von 8 Wochen verschwanden im Röntgenbeugungsdiagramm die Reflexe der anhydrischen Oxide. Dafür traten jetzt sehr breite, diffuse Reflexe im Bereich der Hauptreflexe der Calciumsilikathydrate auf, die jedoch eine Identifizierung der gebildeten Produkte nicht zuließen.

6.2.2 Hydrothermalsynthese

Da, wie aus zahlreichen Veröffentlichungen bekannt, bei der Darstellung von Calciumsilikathydraten bei gewöhnlicher Temperatur stets gelartige Produkte entstehen, die vorstehend angeführten Versuche bestätigen dieses, die sich kaum eindeutig identifizieren lassen, wurde versucht, auf hydrothermale Wege definierte, kristalline Hydrate herzustellen, deren Abbau durch kalkaggressive Kohlensäure dann auch röntgenographisch verfolgt werden konnte. Über die Synthesebedingungen von gut kristallisierten Calciumsilikathydraten haben insbesondere Heller und Taylor in den 50er Jahren (20, 21) berichtet. Unter Berücksichtigung dieser Arbeiten sowie einer Veröffentlichung von Sytnik und Mœdlov-Petrossian aus dem Jahre 1971 (22) wurden folgende Synthesebedingungen für die Darstellung von CSH I gewählt.

Analysenreines CaCO_3 wurde im Muffelofen bei 1.000°C geglüht, und das auf diesem Wege gewonnene Calciumoxid wurde in auf 80°C erwärmtem, kohlensäurefreiem Wasser abgelöscht. Als Säurekomponente wurde SiO_2 , gefällt, getrocknet, das ebenfalls auf 1.000°C vorgeglüht war, zugesetzt. Die so unter Ausschluß von Luftkohlensäure hergestellte Suspension mit einem $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ - Molverhältnis von 1 : 1 und einem Verhältnis flüssige : feste Phase = 10 : 1 wurde bei einer Temperatur von 130°C behandelt. Die hydrothermale Reaktion wurde in einem Autoklaven aus nichtrostendem Stahl durchgeführt, wobei die Reaktionstemperatur auf $\pm 1^\circ \text{C}$ konstant gehalten wurde.

Nach einer Reaktionszeit von 10 Std. wurde der Autoklav auf Zimmertemperatur abgekühlt, das Reaktionsprodukt unter Schutzgas abfiltriert und anschließend unter Vakuum über P_2O_5 im Exsikkator getrocknet.

Die Röntgenbeugungsanalyse des Reaktionsproduktes ergab als einzige vorhandene Phase CSH I.

Die chemische Analyse ergab folgende Werte:

Glühverlust	16,7 %
CaO	40,5 %
SiO_2	38,1 %

7. Versuchsergebnisse

7.1 Angriff kalkaggressiver Kohlensäure auf die reinen Phasen

7.1.1 Tricalcium-Aluminat-Hexahydrat C_3AH_6 [Versuchsreihe A]

Beim Angriff kalkaggressiver Kohlensäure auf die Hydratphase des Calciumaluminats, C_3AH_6 , konnte festgestellt werden, daß das Hydrat durch das aggressive Medium unter Auflösung angegriffen wird, wobei die herausgelöste Substanzmenge von der Kohlensäurekonzentration abhängig ist.

Der mit steigender Kohlensäurekonzentration zu beobachtende Rückgang des Gewichtsverlustes scheint anzudeuten, daß der korrodierende Angriff mit steigender Konzentration geringer wird (Tab. 5). Dieser Schluß ist jedoch falsch und nur darauf zurückzuführen, daß für die aluminatische Komponente die Löslichkeit rückläufig ist, wohingegen praktisch der gesamte Calciumanteil herausgelöst wird (Tab. 8).

Die C_3AH_6 -Phase wird also umso stärker korrodiert, je höher die Konzentration der kalkaggressiven Kohlensäure ist.

Die einzelnen Untersuchungen in dieser Versuchsserie lieferten folgende Ergebnisse (Tab. 8 + 9).

Auffallend ist, daß die Versuchsreihe mit reinem destillierten Wasser, das keine kalkaggressive Kohlensäure enthält, von den anderen Versuchsreihen völlig abweichende Ergebnisse zeigte (Abb. 4). Diese Reihe soll daher gesondert ausgewertet werden.

7.1.1.1 pH-Wert

Unabhängig von der Konzentration der kalkaggressiven Kohlensäure liegt der pH-Wert der ersten Eluatfraktionen zunächst relativ hoch bei $pH = 10 - 11$, fällt dann jedoch nach einiger Zeit in Abhängigkeit der Aggressivität der angreifenden Lösung kontinuierlich bis auf Werte um $pH = 7$ ab und bleibt bis Ende des Versuches nahezu konstant. Wie aus den Meßwerten zu ersehen ist, erfolgt der Abfall umso früher und steiler, je höher die Konzentration der kalkaggressiven Kohlensäure liegt.

7.1.1.2 Calcium

Es ist zunächst ein steiler Anstieg der je Fraktion herausgelösten Calciummenge zu beobachten, der je nach Kohlensäurekonzentration zwischen 3 und 6 % der eingesetzten Calciummenge liegt. Parallel mit dem Abfallen des pH-Wertes sinkt die je Fraktion herausgelöste Calciummenge auf $1/3$ bis $1/2$ der Anfangswerte und bleibt dann über lange Zeit konstant. Erst gegen Ende der Versuchsreihe ist ein weiteres Absinken auf sehr kleine Werte zu beobachten (Abb. 5 - 8).

Insgesamt werden je nach Kohlensäurekonzentration zwischen 70 % und 98 % des gesamten Calciums herausgelöst (Abb. 34).

7.1.1.3 Aluminium

Auch beim Aluminium ist in allen Versuchsreihen zunächst ein sehr steiler Anstieg der je Fraktion herausgelösten Aluminiummenge bis auf Konzentrationen gleicher Größenordnung wie beim Calcium zu beobachten. Es tritt jedoch dann ein relativ schneller Abfall der herausgelösten Aluminiummenge ein. Zur gleichen Zeit, wo die Calciumkonzentration in den Aluatfraktionen absinkt, ist jedoch ein nochmaliger Anstieg der Aluminiumlöslichkeit zu verzeichnen. Lediglich bei der Versuchsreihe A 5 ist dieses nicht mehr zu erkennen; die beiden Maxima fallen übereinander (Abb. 13). Anschließend fällt die Löslichkeit des Aluminiums sehr schnell auf Werte nahe null ab. Aluminium ist dann als praktisch unlöslich zu betrachten (Abb. 10 - 13).

Je höher die Konzentration der kalkaggressiven Kohlensäure ist, desto früher tritt der steile Abfall der Aluminiumlöslichkeit ein und umso weniger ausgeprägt ist der nochmalige Anstieg der Löslichkeit.

Die insgesamt herausgelöste Aluminiummenge liegt je nach Kohlensäurekonzentration zwischen 15 % und 60 % der eingewogenen Menge. Dabei ist auffallend, daß je schwächer die Kohlensäurekonzentration ist, umso höher die insgesamt herausgelöste Aluminiummenge liegt (Abb. 35).

7.1.1.4 Röntgendiagramme

Der nach Durchsatz von 2,5 l kalkaggressiver Kohlensäure verbliebene Rückstand wurde röntgendiffraktometrisch untersucht. In Abhängigkeit von der Konzentration der aggressiven Säure waren folgende Phasen im Rückstand nachzuweisen.

Die Reflexe des C_3AH_6 waren bei sämtlichen Proben verschwunden. Als neue Phasen waren in den Proben Calcit, ein Calcium-Aluminium-Karbonat-Hydrat, insbesondere bei etwas höherem Gehalt an kalkaggressiver Kohlensäure (Versuchsreihe A 3 und A 4), sowie γ -Aluminiumhydroxid (Gibbsit) nachzuweisen.

Bei der Versuchsreihe A 5, größter Gehalt an kalkaggressiver Kohlensäure, waren im Diagramm nur noch die Hauptreflexe des γ -Aluminiumhydroxids nachzuweisen. Aus der Tatsache, daß diese Reflexe sehr diffus auftreten, ist zu schließen, daß die neu gebildete Phase nur schlecht kristallisiert bzw. in Mikrokristallen vorliegt.

7.1.1.5 Angriff destillierten Wassers

Parallel zu den Versuchen mit kalkaggressiver Kohlensäure wurde das C_3AH_6 mit reinem, destilliertem, CO_2 -freiem Wasser behandelt. Diese Versuchsreihe (A 1) zeigte völlig andere Ergebnisse (Tab. 8 + 9) .

Der pH-Wert der einzelnen Fraktionen blieb praktisch über die gesamte Versuchsreihe konstant bei Werten um pH = 10 - 11,5.

Trotz des unverändert hohen pH-Wertes sank die je Eluatfraktion herausgelöste Calciummenge nach einen kurzen Anstieg auf Werte von ca. 4 % der Einwaage bereits nach etwa 10 Fraktionen auf Werte von ca. 2 % der Einwaage ab und fiel dann stetig bis auf Werte, die bei etwa 1 % der Einwaage liegen (Abb. 4).

Die insgesamt herausgelöste Calciummenge lag niedriger als in den anderen Versuchsreihen der Serie A bei 69 % der Einwaage (Abb. 34).

Die Löslichkeit des Aluminiums zeigte ebenfalls einen völlig anderen Verlauf. Die je Fraktion herausgelöste Aluminiummenge stieg zunächst langsam bis auf Werte von etwa 2 % der Einwaage, fiel dann jedoch gleichermaßen auf Werte von weniger als 1 % der Einwaage ab. Von der Fraktion 10 ab war dann ein sehr langsamer kontinuierlicher Abfall in der Löslichkeit zu beobachten. In den letzten Fraktionen dieser Versuchsreihe waren aber immer noch etwa 0,3 % der Einwaage an Aluminium enthalten (Abb. 9).

Während der Versuchsreihe wurden insgesamt etwa 38 % der eingesetzten Aluminiummenge herausgelöst (Abb. 35).

Aus dem vom Löserückstand aufgenommenen Röntgendiagramm war zu ersehen, daß nach wie vor unzersetztes C_3AH_6 vorliegt. Daneben sind Reflexe von Calcit und Aragonit sowie der Calcium-Aluminat-Karbonat-Hydratphase nachzuweisen.

7.1.2 Calcium-Silikat-Hydrat CSH I [Versuchsreihe B]

Ebenso wie das C_3AH_6 wurde die Calciumsilikathydratphase durch kalkaggressive Kohlen-säurelösung zersetzend angegriffen. Wie beim C_3AH_6 war auch hier der Angriff umso stärker, je höher die Konzentration des aggressiven Mediums war (Tab. 6).

Die einzelnen Untersuchungen in dieser Versuchsserie zeigten folgende Ergebnisse (Tab. 10 + 11).

Da auch bei dieser Serie die Versuchsreihe mit destilliertem Wasser völlig abweichende Ergebnisse zeigte, soll sie ebenfalls gesondert ausgewertet werden.

7.1.2.1 pH-Wert

Der pH-Wert der ersten Fraktionen lag bei Werten um $pH = 10$, etwas niedriger als beim C_3AH_6 . Er sank kontinuierlich auf Werte um $pH = 7$ ab und blieb dann bis Versuchsende konstant. Auch hier setzte das Absinken auf kleinere pH-Werte umso früher ein, je höher die Kohlensäurekonzentration der angreifenden Lösung war.

7.1.2.2 Calcium

Die Löslichkeit des Calciums zeigte vollkommen anderen Verlauf als beim C_3AH_6 . Die herausgelöste Calciummenge lag in den ersten Fraktionen zunächst sehr niedrig bei Werten von etwa 1 % der Einwaage, zeigte aber nach einiger Zeit, parallel zum Absinken des pH-Wertes auf Werte nahe 7 sowie parallel zur Abnahme der Siliciumlöslichkeit, einen Anstieg auf etwa das Dreifache der Anfangslöslichkeit (Abb. 15 - 18, Tab. 10). Bei höherer Konzentration der kalkaggressiven Kohlensäure trat zwischenzeitlich ein Rückgang in der Löslichkeit ein.

Die Summe des herausgelösten Calciums betrug je nach Kohlensäurekonzentration bis zu 86 % der Einwaage. Mit steigender Aggressivität der Lösung erhöhte sich die herausgelöste Calciummenge (Abb. 36).

7.1.2.3 Silicium

Beim Silicium war zunächst ein relativ steiler Anstieg der je Fraktion herausgelösten Menge zu beobachten. Die Absolutmenge überstieg dabei die Calciummenge etwa um den Faktor 3. Nach Durchlaufen eines Maximums, das sich mit steigender Kohlensäurekonzentration zu den ersten Fraktionen hin verschiebt, sank die herausgelöste Menge auf einen konstanten Wert um 1 mg/Fraktion entsprechend 0,1 % der Einwaage ab und blieb bis Ende der Versuchsreihe konstant. Dabei war der Abfall umso steiler, je höher die Konzentration der kalkaggressiven Kohlensäure lag (Abb. 20 - 23, Tab. 11). Die Summe des herausgelösten Siliciums betrug bis zu 80 % der Einwaage. Auffallend war auch hier, daß wie beim Aluminium die insgesamt herausgelöste Siliciummenge mit fallendem Kohlensäuregehalt ansteigt (Abb. 37).

7.1.2.4 Röntgendiagramme

Die vom Rückstand aufgenommenen Röntgendiagramme zeigten nur die Reflexe vom Calcit. Das Ausgangsprodukt CSH I sowie eventuelle weitere, neben dem Calcit neu gebildete Produkte sind röntgenographisch nicht nachzuweisen.

7.1.2.5 Angriff destillierten Wassers

Neben den Versuchsreihen mit aggressiver Kohlensäure wurde auch eine Versuchsreihe mit reinem destillierten, kohlensäurefreiem Wasser als Vergleich durchgeführt. Wie beim C_3AH_6 waren auch hier die Ergebnisse von denen der Reihen B 2 - B 5 vollkommen abweichend. Der pH-Wert blieb praktisch über die gesamte Versuchsdauer konstant bei Werten von pH 10 - 11.

Die je Fraktion herausgelöste Calciummenge sank von 3,6 mg Calcium entsprechend etwa 1 % der Einwaage in der ersten Fraktion langsam und kontinuierlich bis Versuchsende auf einen Wert von 1,3 mg entsprechend ca. 0,4 % der Einwaage ab (Abb. 14).

Die je Fraktion herausgelöste Siliciummenge lag bei etwa 1 mg entsprechend 0,5 % der Einwaage in der ersten Fraktion und stieg kaum merkbar von Fraktion zu Fraktion an (Abb. 19).

Die insgesamt herausgelösten Calcium- und Siliciummengen lagen unter den Werten der Reihen B 2 - B 5 bei 34 % der Einwaage für Calcium und bei 26 % der Einwaage für Silicium (Abb. 36, 37).

Wie beim C_3AH_6 waren im Röntgendiagramm des Löserückstandes auch die Hauptreflexe des Calcit nachzuweisen. Auffallend war jedoch, daß der Hauptreflex an der Basis sehr stark verbreitert war, was darauf hindeutet, daß hier eine Überlagerung mit einem anderen Reflex vorlag. Da an gleicher Stelle der Hauptreflex des CSH I liegt ($3,07 \text{ \AA}$), war zu vermuten, daß noch unzersetztes Calciumsilikathydrat im Rückstand vorhanden war. Diese Annahme wurde gestützt durch das Auftreten eines weiteren Hauptreflexes von CSH I bei $1,84 \text{ \AA}$, der im Diagramm des Rückstandes ebenfalls vorhanden war.

7.2 Löslichkeitsverhalten von $\gamma\text{-Al(OH)}_3$

Zur Überprüfung der Feststellung, daß bei der Umwandlung von α -Aluminiumhydroxid in die γ -Form die Verbindung zunehmend unlöslicher wird, wurde eine Versuchsreihe mit reinem $\gamma\text{-Al(OH)}_3$ (Gibbsit) durchgeführt.

Die Ergebnisse, die in der Tabelle 12 zusammengestellt sind, bestätigten die gemachte Annahme. γ -Al(OH)₃ wird von kalkaggressiver Kohlensäure praktisch nicht angegriffen. Die in den Fraktionen ermittelten Aluminiumgehalte lagen unter der Erfassungsgrenze.

Der pH-Wert, der während der gesamten Versuchsreihe unter pH = 5 lag, zeigt ebenfalls an, daß keine Neutralisation der Kohlensäure, also keine Reaktion mit Aluminiumhydroxid, erfolgt war.

Das Röntgendiagramm des Rückstandes enthielt nur die Reflexe des Gibbsit, γ -Al(OH)₃.

7.3 Einfluß von Calciumhydroxid auf die Korrosion der Reinphasen

7.3.1 C₃AH₆ + Ca(OH)₂ [Versuchsreihe C]

Auch das Gemisch aus C₃AH₆ und Ca(OH)₂, das in einem Verhältnis entsprechend dem Mengenverhältnis in einem vollständig hydratisierten Portlandzement hergestellt wurde, wurde von kalkaggressiver Kohlensäure angegriffen. Der gesamte Gewichtsverlust nach Durchsatz von 2,5 l aggressiver Lösung betrug > 90 % der Einwaage, woraus zu ersehen war, daß neben dem Ca(OH)₂ auch die Calciumaluminathydratphase praktisch vollständig korrodiert wurde (Tab. 7).

Im einzelnen ergaben sich folgende Versuchsergebnisse (Tab. 13).

7.3.1.1 pH-Wert

Der pH-Wert lag zunächst bei Werten über pH = 11, fiel dann jedoch sehr plötzlich auf Werte um pH = 7 ab und blieb bis Ende der Versuchsreihe etwa konstant. Verglichen mit der Versuchsreihe A 5, reines C₃AH₆, war festzustellen, daß das Absinken des pH-Wertes etwas später einsetzte.

7.3.1.2 Calcium

Die herausgelöste Calciummenge lag in den ersten Fraktionen zunächst höher als bei der entsprechenden Reihe A 5 mit reinem C_3AH_6 bei Werten um 40 mg, entsprechend 10 % der Einwaage, fiel dann aber sehr steil bis auf Werte von ca. 5 mg, entsprechend 0,8 % der Einwaage, an und blieb bis Ende der Versuchsreihe konstant (Abb. 24).

Abgesehen von den erhöhten Mengen in den ersten 6 Fraktionen, hervorgerufen durch das relativ leicht lösliche Calciumhydroxid, entsprach der Verlauf dem Angriff auf die reine Phase.

Insgesamt wurden 91 % des gesamten Calciums herausgelöst (Abb. 38).

7.3.1.3 Aluminium

Die je Fraktion herausgelöste Aluminiummenge lag erheblich niedriger als bei der entsprechenden Vergleichsreihe A 5. Nach 4 Fraktionen war ein Anstieg auf ca. 3 mg Aluminium je Fraktion zu beobachten, gefolgt jedoch von einem ebenso raschen Abfall auf Werte $< 0,1$ mg. Die Aluminiumkonzentration fiel in den weiteren Fraktionen kontinuierlich weiter und strebte gegen Null (Abb. 25).

Die insgesamt herausgelöste Aluminiummenge lag jedoch höher als bei der Versuchsreihe A 5 bei 22,5 % der Einwaage (Abb. 39).

7.3.1.4 Röntgendiagramm

Im Röntgendiagramm des Rückstandes traten neben Calcit-Reflexen nur noch die Hauptreflexe des γ - $Al(OH)_3$ auf. Reflexe einer karbonathaltigen Calcium-Aluminat-Hydratphase waren im Diagramm nicht nachzuweisen.

7.3.2 CSH I + $Ca(OH)_2$ [Versuchsreihe D]

Das entsprechend dem Verhältnis in reinem vollständig hydratisiertem Portlandzement zusammengesetzte Gemisch aus CSH I und $Ca(OH)_2$ wurde ebenfalls von kalkaggres-

siver Kohlensäure zersetzend angegriffen. Nach Einwirken von 2,5 l aggressiver Lösung betrug der Gewichtsverlust ca. 77 % der Einwaage, ein Zeichen dafür, daß auch die Silikathydratphase korrodiert wurde (Tab. 7).

Die einzelnen Versuchsergebnisse sind in der Tabelle 14 zusammengestellt.

7.3.2.1 pH-Wert

Der pH-Wert lag auch hier in den ersten Fraktionen höher als in der vergleichbaren Versuchsreihe B 5 mit reinem CSH I bei Werten von pH = 11,7. Bereits nach Durchsatz von 250 ml kalkaggressiver Lösung war jedoch ein Abfall des pH-Wertes bis auf Werte um pH = 7 zu beobachten. Dieser Wert verringerte sich bis Versuchsende auf Werte um pH = 6,3.

7.3.2.2 Calcium

Die Calciumkonzentration in den ersten beiden Fraktionen lag verglichen mit den entsprechenden Werten der Versuchsreihe B 5 höher, bei ca. 40 mg, fiel dann aber sehr steil auf Werte zwischen 2 - 3 mg/Fraktion ab. Nachdem ca. 33 % der Einwaage des Calciums herausgelöst waren, konnte ein geringer Anstieg bis auf Werte um 6 - 7 mg/Fraktion beobachtet werden, und erst gegen Ende der Versuchsreihe war ein erneutes Abfallen der Calciumkonzentration zu verzeichnen (Abb. 26).

Der Verlauf der je Fraktion herausgelösten Calciummenge entsprach im zweiten Teil der Versuchsreihe dem Angriff auf die reine CSH I - Phase.

Insgesamt wurden bei dieser Versuchsreihe 88 Gew.-% des eingesetzten Calciums herausgelöst (Abb. 38).

7.3.2.3 Silicium

Der Gehalt an gelöstem Silicium in den einzelnen Fraktionen stieg von anfangs geringen Werten nach ca. 200 ml steil an bis auf Konzentrationen > 4 mg/Fraktion. Wie bei der vergleichbaren Versuchsreihe B 5 mit reinem CSH I setzte jedoch sehr schnell ein Rückgang der je Fraktion herausgelösten Menge ein bis auf konstante

Werte um 1 mg. Erst gegen Ende der Versuchsreihe war ein weiterer Konzentrationsabfall bis auf ca. 0,3 mg/Fraktion zu beobachten (Abb. 27).

Die insgesamt herausgelöste Siliciummenge betrug 66 Gew.-% des Einsatzes (Abb. 40).

7.3.2.4 Röntgendiagramm

Das Röntgendiagramm des Rückstandes zeigte nur Reflexe des Calcits. Andere Phasen, wie z.B. Ausgangssubstanz oder karbonathaltige Zwischenprodukte, waren nicht nachzuweisen.

7.4 Gegenseitige Beeinflussung von CSH I und C_3AH_6 [Versuchsreihe E]

Das aus den beiden Reinphasen CSH I und C_3AH_6 entsprechend dem Mengenverhältnis in einem vollständig hydratisierten Portlandzement hergestellte Gemisch wurde ebenfalls von der kalkaggressiven Kohlensäurelösung zersetzend angegriffen. Nach Einwirkung von 2,5 l aggressiver Lösung wurde ein Gewichtsverlust von 68 % der Einwaage festgestellt (Tab. 7). Die einzelnen Versuchsergebnisse sind in der Tabelle 15 zusammengestellt.

7.4.1 pH-Wert

Der pH-Wert nahm in dieser Versuchsreihe nicht vergleichbar hohe Werte wie in den vorangegangenen Reihen an. Er lag in der ersten Fraktion bei ca. pH = 9,5 - also unter 10! -, fiel dann relativ schnell auf Werte um pH = 6,5 ab. Gegen Ende der Versuchsreihe war ein weiterer, wenn auch geringfügiger Rückgang bis auf pH = 5,9 zu beobachten.

7.4.2 Calcium

Die Calciumkonzentration in den Eluatfraktionen lag zunächst sehr niedrig bei Werten von ca. 1 % der Einwaage, stieg sodann langsam auf etwa die doppelte Menge an und blieb über lange Zeit konstant. Gegen Schluß der Versuchsreihe war ein kontinuierlicher Rückgang der Konzentration gegen Null zu beobachten (Abb. 28).

Auffallend war, daß die bei der reinen C_3AH_6 -Phase beobachtete starke Herauslösung des Calciums zu Beginn der Versuchsreihe hier nicht zu verzeichnen war. Der Kurvenverlauf der Calciumkonzentration ähnelte mehr dem des Angriffs auf die CSH I - Phase (Abb. 18).

Insgesamt wurden von der eingesetzten Calciummenge in dieser Versuchsreihe 76 % herausgelöst (Abb. 38).

7.4.3 Aluminium

Aluminium ist praktisch von Beginn des Versuches an als unlöslich zu betrachten. Nach Durchsatz von 2,5 l kalkaggressiver Kohlensäurelösung wurden nur insgesamt 0,4 % der Aluminiumeinwaage herausgelöst.

7.4.4 Silicium

Die Löslichkeit des Siliciums entsprach dem Angriff der Kohlensäurelösung auf die reine CSH I - Phase (Abb. 29). Insgesamt wurden bei diesem Versuch ca. 45 % der Siliciumeinwaage herausgelöst (Abb. 40).

Wie bei der Versuchsreihe B 5 - reines CSH I - konnte auch hier parallel zum Anstieg der Calciumkonzentration ein Abfall des Siliciumgehaltes in den Eluatfraktionen festgestellt werden.

7.4.5 Röntgendiagramm

Im Röntgendiagramm des Rückstandes konnten eindeutig die Reflexe des C_3AH_6 identifiziert werden. Leider war es nicht möglich, weitere 6 Reflexe im Diagramm zu identifizieren. Es muß sich hier um Röntgenreflexe bisher unbekannter Substanzen handeln, die in der Röntgenkartei bei ASTM bis 1972 noch nicht erfaßt waren.

7.5 Korrosionsverhalten eines Modellzementes [Versuchsreihe F]

Entsprechend dem Verhältnis Calcium : Aluminium : Silicium in einem Portlandzement wurde aus den drei Hydratphasen $\text{Ca}(\text{OH})_2$, C_3AH_6 und CSH I ein Modellzement zusammengesetzt und dem korrodierenden Angriff von kalkaggressiver Kohlensäurelösung ausgesetzt. Der Versuch zeigte, daß durch den Angriff von 2,5 l der aggressiven Lösung insgesamt 66 Gew.-% von dem Gemisch herausgelöst wurden (Tab. 7).

Im einzelnen ergaben sich folgende Ergebnisse (Tab. 16).

7.5.1 pH-Wert

Der pH-Wert in den ersten Eluatfraktionen lag relativ hoch bei etwa $\text{pH} = 11$, fiel dann jedoch sehr bald auf Werte um $\text{pH} = 6,5$ ab und blieb bis Schluß der Versuchsreihe auf diesem Wert.

7.5.2 Calcium

Die Konzentration des Calciums lag in der ersten Fraktion vergleichsweise hoch bei ca. 37 mg, entsprechend 10 % der Einwaage, fiel in den beiden nächsten Fraktionen jedoch sehr steil ab bis auf Werte < 1 % der Einwaage. Ab Fraktion 8 war ein geringer Anstieg bis auf Werte entsprechend ca. 1,5 % der Einwaage zu beobachten. Diese Konzentration blieb bis Ende der Versuchsreihe nahezu konstant (Abb. 30).

Der Verlauf entsprach etwa dem Korrosionsverhalten in der Versuchsreihe D (Abb. 26).

Insgesamt wurden bei dieser Versuchsreihe 75 % der Calciumeinwaage herausgelöst (Abb. 38).

7.5.3 Aluminium

Hier trat die gleiche Erscheinung auf wie bei der Versuchsreihe E, d.h. die C_3AH_6 -Phase wurde praktisch nicht angegriffen, obwohl der pH-Wert in den ersten Frak-

tionen hoch lag und bei entsprechender Höhe des pH-Wertes in Versuchsreihe A 5 bereits erhebliche Mengen an Aluminium herausgelöst wurden.

Insgesamt wurden bei diesem Versuch nur 0,5 % des Aluminiumanteils herausgelöst, praktisch also keine Korrosion der C_3AH_6 -Phase.

7.5.4 Silicium

Das Löslichkeitsverhalten des Siliciums entsprach den Ergebnissen der Versuchsreihe E. Nach anfänglich geringer Siliciumkonzentration stieg die je Fraktion herausgelöste Siliciummenge ab Fraktion 3 steil an bis auf Gehalte von ca. 4 % der Einwaage.

Nach Durchlaufen eines Maximums in Fraktion 6 fiel die Konzentration ebenso schnell wieder bis auf Werte von ca. 1 % der Einwaage ab und verringerte sich dann langsam bis Versuchsende weiter bis auf Werte von ca. 0,1 % der Siliciumeinwaage (Abb. 31).

Insgesamt wurden bei dieser Versuchsreihe ca. 47 % des Siliciumanteils durch das aggressive Medium herausgelöst (Abb. 40).

7.5.5 Röntgendiagramm

Im Röntgendiagramm des Rückstandes waren nur die Reflexe des Calcit nachzuweisen. Alle anderen eventuell noch vorhandenen Reflexe wurden durch die stärkeren Calcitreflexe zurückgedrängt und konnten neben dem in überwiegender Menge vorliegenden Calcit nicht mehr erfaßt werden.

7.6 Korrosionsverhalten von hydratisiertem Portlandzement [Versuchsreihe G]

Als Abschluß wurde das Korrosionsverhalten eines normalen vollständig hydratisierten Portlandzementes (PZ 275 Teutonia) untersucht.

Der durch die Korrosion der kalkaggressiven Kohlensäure verursachte Gewichtsverlust stimmte mit dem Wert, der für den Modellzement ermittelt wurde, sehr gut überein. Es wurden durch 2,5 l der aggressiven Lösung insgesamt 64 % der Einwaage herausgelöst (Tab. 7).

Die Versuchsreihe zeigte im einzelnen folgende Ergebnisse (Tab. 17).

7.6.1 pH-Wert

Der pH-Wert lag in den ersten Fraktionen bei ca. pH = 11, fiel anschließend relativ schnell auf Werte um pH = 6,5 - 7,0 ab und blieb bis Schluß der Versuchsreihe etwa konstant.

7.6.2 Calcium

Bezüglich der Calciumkonzentration in den einzelnen Fraktionen ließ sich das gleiche Ergebnis feststellen wie bei der Versuchsreihe mit dem Modellzement. Hohe Konzentrationen, entsprechend ca. 10 % der Einwaage in der ersten Fraktion, steiler Abfall bis auf Werte < 1 % der Einwaage, gefolgt von einem nochmaligen Anstieg bis auf Gehalte von ca. 2 % und anschließend ein langsamer kontinuierlicher Abfall bis auf Konzentrationen von ca. 1 % der Einwaage zum Schluß der Versuchsreihe (Abb. 32).

Insgesamt wurden in dieser Reihe 80 % des Calciumanteils herausgelöst (Abb. 38).

7.6.3 Aluminium

Auch beim hydratisierten Portlandzement wurde die C_3AH_6 -Phase praktisch nicht korrodiert. Insgesamt wurden nur 0,2 % des Aluminiums durch die aggressive Kohlensäure herausgelöst.

7.6.4 Silicium

Die Tendenz des korrodierenden Angriffs auf die Silikathydratphase im hydratisierten Portlandzement war die gleiche wie beim Modellzement. Die Konzentrationswerte lagen jedoch etwas unter den Werten der Versuchsreihe F (Abb. 33).

Insgesamt wurden bei dieser Versuchsreihe 27 % des eingesetzten Siliciums durch die 2,5 l aggressiver Lösung herausgelöst (Abb. 40).

7.6.5 Röntgendiagramm

Wie bereits beim Modellzement waren auch hier im Röntgendiagramm nur die Reflexe des Calcit nachzuweisen. Eventuell vorhandene andere Kristallphasen konnten neben dem in großer Menge vorliegenden Calcit röntgenographisch nicht erfaßt werden.

8. Auswertung

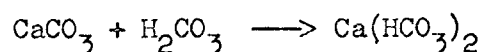
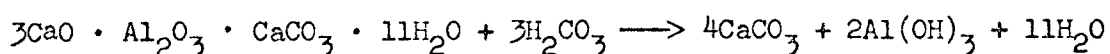
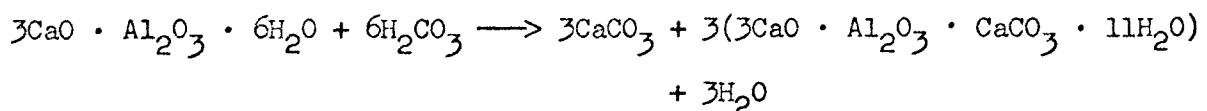
Beide Hydratphasen, C_3AH_6 und CSH I, wurden von kalkaggressiver Kohlensäure zersetzend angegriffen. Der Angriff auf die beiden Phasen erfolgte dabei offensichtlich nach unterschiedlichem Reaktionsschema. Während beim C_3AH_6 zunächst hohe Anteile des Calciums herausgelöst wurden und nach einer gewissen Zeit, parallel zum Absinken des pH-Wertes auf Werte unter $pH = 8$, ein Abfall der je Fraktion herausgelösten Calciummenge zu beobachten war, lagen die Lösungsverhältnisse des Calciums beim CSH I vollkommen anders.

Hierbei war die herausgelöste Calciummenge zunächst niedrig und stieg mit Absinken des pH-Wertes unter $pH = 8$ plötzlich steil an.

Auch Aluminium und Silicium zeigten unterschiedliches Löslichkeitsverhalten. Während beim Aluminium zunächst hohe Anteile aus der Verbindung herausgelöst wurden, gefolgt von einem sehr steilen Abfall der Löslichkeit, war beim Silicium ein langsamerer Anstieg der je Fraktion herausgelösten Menge zu beobachten. Während beim Aluminium die Löslichkeit praktisch sehr schnell gegen Null ging, wurde beim Silicium weiterhin eine konstante, wenn auch geringe Menge herausgelöst.

Für den bei den höheren Kohlensäurekonzentrationen aufgetretenen zwischenzeitlichen Rückgang der Löslichkeit des Siliciums konnte bislang keine Erklärung gefunden werden.

Auffallend war beim C_3AH_6 , daß parallel zum Absinken der je Fraktion herausgelösten Calciummenge ein nochmaliger kurzer Anstieg der Aluminiumlöslichkeit zu beobachten war. In Verbindung mit den Röntgenfeinstrukturaufnahmen ließ sich aus diesem Erscheinungsbild folgender eventueller Reaktionsmechanismus ableiten:



Das C_3AH_6 wird unter Bildung zweier neuer Phasen, Calcit und C_3ACcH_{11} , durch die Kohlensäure zersetzt. Von diesen Neubildungen wird nunmehr bevorzugt das Calcit herausgelöst. Nach dem Herauslösen des gesamten Calcitanteils tritt nun die weitere Zersetzung der Karbonathydratphase ein. Das hierbei entstehende α -Aluminiumhydroxid ist zunächst beschränkt in Kohlensäurelösung löslich, was zu einem erneuten Ansteigen der herausgelösten Aluminiummenge führt. Bei weiterem Einwirken von Kohlensäure tritt eine Umwandlung des gelförmigen, röntgenamorphen α - $Al(OH)_3$ in das kristalline γ - $Al(OH)_3$ ein, wodurch die Verbindung zunehmend unlöslicher wird.

Je stärker die Kohlensäurekonzentration ist, desto schneller erfolgt diese "Alterung" und desto steiler ist der Abfall der Löslichkeit.

Beim CSH I war auffallend, daß entgegen den Erscheinungen beim C_3AH_6 erst mit einem Absinken der Siliciumlöslichkeit ein steiler Anstieg der Löslichkeit des Calciums eintrat. Möglich wäre auch bei dieser Versuchsserie die Bildung einer karbonathaltigen Phase, bei deren Zersetzung dann bevorzugt das Calcium herausgelöst wird. Eine Bestätigung dieser Vermutung konnte durch die Untersuchungen nicht gegeben werden, da in den Röntgendiagrammen keine Reflexe einer solchen Phase auftraten.

Durch den Zusatz von Calciumhydroxid zu den Reinphasen C_3AH_6 und CSH I sollte festgestellt werden, ob in irgendeiner Weise eine Beeinflussung des korrodierenden Angriffs auf diese Produkte zu verzeichnen war.

Auf Grund der Ergebnisse läßt sich feststellen, daß in beiden Fällen eine Überlagerung des Angriffs auf Calciumhydroxid mit dem Angriff auf C_3AH_6 bzw. CSH I eintrat. Die sehr hohen Calciumkonzentrationen in den ersten Fraktionen waren auf den bevorzugten Angriff auf die relativ leicht in kalkaggressiver Kohlensäurelösung lösliche Calciumhydroxid-Phase zurückzuführen. Nachdem praktisch der gesamte Calciumanteil des $Ca(OH)_2$ herausgelöst war, entsprach der weitere Korrosionsverlauf dem Angriff auf die Reinphasen C_3AH_6 und CSH I.

Die Zersetzung der C_3AH_6 -Phase wurde durch das Vorhandensein von $Ca(OH)_2$ in der Weise beeinflusst, daß die bei der vergleichbaren Versuchsreihe A 5 beobachtete hohe Aluminiumkonzentration in den ersten Eluatfraktionen nicht auftrat. Offensichtlich wurde durch den bevorzugten Angriff der Kohlensäurelösung auf das $Ca(OH)_2$ die Aluminatphase zunächst nur sehr wenig korrodiert, und erst nachdem ca. 50 % des $Ca(OH)_2$ herausgelöst waren, entsprechend etwa 150 mg Calcium, stieg die Aluminiumkonzentration in den Fraktionen etwas an.

Durch die Neutralisation der kalkaggressiven Kohlensäure durch das freie $Ca(OH)_2$ zu Beginn der Versuchsreihe - der Abfall des pH-Wertes setzte erst ein, nachdem die Hauptmenge des $Ca(OH)_2$ herausgelöst war - setzte auch die "Alterung" des gebildeten Aluminiumhydroxids erst zu einem späteren Zeitpunkt ein, so daß insgesamt eine größere Menge Aluminium herausgelöst werden konnte, als wenn der Angriff auf die reine C_3AH_6 -Phase erfolgte. Zum Zeitpunkt des Rückgangs des pH-Wertes auf Werte um $pH = 7$ waren bereits ca. 20 % des gesamten Aluminiums herausgelöst, gegenüber 17 % beim Angriff auf die reine Phase (Versuchsreihe A 5).

Durch den Gehalt an $Ca(OH)_2$ tritt zwar eine Verzögerung der Alterung des $Al(OH)_3$ ein, die eigentliche Zersetzung der C_3AH_6 -Phase wird aber durch den $Ca(OH)_2$ -Gehalt der Ausgangsmischung praktisch nicht beeinflusst.

Wie beim C_3AH_6 wurde auch bei dem Gemisch des CSH I mit $Ca(OH)_2$ zunächst bevorzugt das Calciumhydroxid angegriffen. Da während dieser Neutralisationsphase der Angriff auf das CSH I nur sehr gering ist, wurde in den ersten Fraktionen auch nur sehr wenig Silicium herausgelöst. Nach Herauslösen der Hauptmenge des Calciumhydroxids nahm auch hier der korrodierende Angriff auf das CSH I zu und entsprach in seinem Verlauf etwa dem Angriff auf die reine Phase. So konnte auch hier parallel zum Abfall der Siliciumlöslichkeit wieder ein Anstieg der je Fraktion herausgelösten Calciummenge beobachtet werden.

Da auch bei dieser Versuchsreihe die insgesamt herausgelöste Siliciummenge höher als bei der entsprechenden Vergleichsreihe B 5 lag, ist eine ähnliche Verzögerung der Alterung wie beim Aluminiumhydroxid nicht auszuschließen.

Eine Beeinflussung des Korrosionsverhaltens durch das gemeinsame Vorhandensein der Phasen C_3AH_6 und CSH I in einem Verhältnis, wie es etwa auch in einem vollständig hydratisierten Portlandzement vorliegt, war nur in Bezug auf die C_3AH_6 -Phase zu beobachten. Diese wurde unter den vorliegenden Bedingungen von kalkaggressiver Kohlensäure praktisch nicht angegriffen. Nur in untergeordneten Mengen erfolgt unter Einlagerung von CO_2 die Bildung einer Calcium-Aluminium-Karbonat-Hydratphase. Im Gegensatz dazu erfolgte der korrodierende Angriff auf die CSH I-Phase in genau der gleichen Weise wie bei der Einwirkung auf die reine Phase.

Der herausgelöste Calciumanteil von ca. 70 % der Einwaage (entsprechend 228 mg) entstammte fast ausschließlich aus der CSH I-Phase. Bei einer Einwaage von 677 mg CSH I mit einem Calciumgehalt von ca. 29 % entsprach das einer Calciummenge von 196 mg.

Bei der Einwirkung von kalkaggressiver Kohlensäurelösung auf einen hydratisierten Modellzement wurde zunächst der Calciumhydroxidanteil durch die Kohlensäure bevorzugt herausgelöst. Wie in der Versuchsreihe D war während dieser anfänglichen "Neutralisationsphase" der Angriff auf die CSH I-Phase nur sehr gering, nahm jedoch dann sehr rasch zu und entsprach in seinem weiteren Verlauf dem Angriff der kalkaggressiven Lösung auf die reine Phase.

Eine Beeinflussung durch das Vorhandensein der C_3AH_6 -Phase lag, wie die Ergebnisse der Versuchsreihe E erwarten ließen, nicht vor.

Demgegenüber wurde aber auch hier, wie in der Versuchsreihe E, die Aluminathydratphase praktisch wieder nicht angegriffen. Selbst nach dem Herauslösen des Hauptanteils des Calciums vom $Ca(OH)_2$ trat im Gegensatz zur Vergleichsreihe C keine Erhöhung der herausgelösten Aluminiummenge ein. Durch das Vorhandensein der CSH I-Phase war also die aluminatische Komponente vor dem korrodierenden Angriff geschützt (vergl. Versuchsreihe E).

Die gesamte herausgelöste Calciummenge von 275 mg müßte also nur aus dem Ca(OH)_2 - und CSH I-Anteil der Ausgangsmischung stammen. Die quantitative Berechnung der Calciumgehalte dieser Phasen bestätigt diese Annahme - Calciumanteil von Ca(OH)_2 und CSH I = 292 mg, entsprechend 80 % der Einwaage an Calcium.

9. Zusammenfassung

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen läßt sich ableiten, daß die wichtigsten Hydratphasen in einem hydratisierten Portlandzement, das C_3AH_6 und die Tobermoritphase, von kalkaggressiver Kohlensäurelösung zersetzend angegriffen werden. Durch die Anwesenheit von CSH I wird die Aluminathydratphase zunächst vor dem korrodierenden Angriff geschützt und primär die Tobermoritphase durch das aggressive Medium herausgelöst. Dabei lassen die Ergebnisse erkennen, daß es bei kontinuierlichem Angriff kalkaggressiver Kohlensäure, d.h. ständiger Erneuerung des angreifenden Mediums und Abführung der herausgelösten Produkte, zur Ausbildung einer Schutzschicht durch Aluminium- und Siliciumhydroxidgele, wie sie von einigen Wissenschaftlern angenommen wird, nicht kommt. Beide Produkte sind in kohlensäurehaltigem Wasser wenn auch minimal, so doch merklich löslich. Durch die aggressive Kohlensäure wird das gebildete Aluminiumhydroxid allmählich in die kristalline γ -Form umgewandelt und wird damit zunehmend unlöslicher.

Da diese Umwandlung in die kristalline Form jedoch mit einer Vergrößerung der Dichte verbunden ist (23), ist eine Schutzwirkung zu verneinen, da die Dichteänderung zur Ausbildung von Mikrorissen führt und somit immer wieder neue Stellen dem zersetzenden Angriff der Kohlensäure zugänglich gemacht werden.

Literaturverzeichnis

- 1) Biczok, I.:
Betonkorrosion, Betonschutz
Bauverlag GmbH, Wiesbaden, 1968
- 2) Locher, F.W.:
Chemischer Angriff auf Beton
Betontechn. Ber. 1967, 19 - 34
- 3) Gille, F.:
Über den Einfluß des Kalkgehaltes des Zements und Zuschlags
auf das Verhalten des Betons in sauren Wässern
beton (1962) 12, 467 - 470
- 4) Mall, G.:
Einwirkung von kohlensäurehaltigem Wasser auf Zement
Zement-Kalk-Gips (1951/4) 291 - 293
- 5) Steopoe, A.:
Die Einwirkung der Kohlensäure auf erhärteten Zement
Zement (1935) 24, 795 - 797
- 6) Papp, Sz.:
Die aggressiven Wässer
MTI Budapest (1954)
- 7) Sevieri, V., Guttman, A.:
Beton aus granulierter Hochofenschlacke
Tonindustrie-Zeitung 1934, 587 + 616
- 8) Hochofenzemente in chemisch angreifenden Wässern
Tonindustrie-Zeitung (1965) 7/8, 159 - 165
- 9) Smolczyk, H.-G.:
Die röntgenographische Bestimmung der Kristallphasen des PZ-Klinkers
Zement-Kalk-Gips (1961) 14, 553
- 10) Atack, F.W.:
A new reagent for the detection and colorimetric estimation of Aluminium
J. Soc. Chem. Ind. (1915) 34, 936
- 11) Photometrische Metall- und Wasseranalysen
(1967), B-b 1/2

- 12) Kosak, A., Ballozo, H.:
Stufenweise chelatometrische Titration von Calcium und Magnesium
mit visueller Endpunktsanzeige neben höheren Eisen(III)-Konzentrationen
Z.Anal.Chem. (1971) 253, 262 - 266
- 13) Belcher, R., Crossland, B., Fennel, T.R.F.W.:
Submicrodetermination of aluminium, bismuth and copper in organometallic
compounds, Talanta (1970) 17, 639 - 641
- 14) Photometrische Metall- und Wasseranalysen
(1967), B-a 1
- 15) Suana Tomás, L.Q.M.:
Über die Hydratation des Tricalciumsilikats: Beiträge zum Studium
der Zementabbindung
Dissertation, Karlsruhe 1959
- 16) Taylor, H.F.W.:
The chemistry of cements, Vol. 1/2
Academic Press, London u. New York 1964
- 17) Herstellung von C_3S , C_2S , C_3A und C_4AF
Privatmitteilung
- 18) Franke, B.:
Bestimmung von Calciumoxid und Calciumhydroxid neben wasserfreiem
und wasserhaltigem Calciumsilikat
Z.f. anorg. u. allg. Chemie (1941) 247, 180
- 19) Schwiete, H.E., Tan Tik-Ien, A.:
Contribution to the Determination of Heat of Hydration of Clinker Minerals
4. Intern. Symp. on Chemistry of Cements,
Washington D.C. 1960, Paper IV-S 10
- 20) Taylor, H.F.W.:
Hydrated Calcium Silicates, Part I.
Compound Formation at Ordinary Temperatures
J.chem. Soc. 1950(IV), 3682

Taylor, H.F.W., Heller, L.:
Hydrated Calcium Silicates, Part II.
Hydrothermal Reactions:
Lime : Silica Ratio 1 : 1
J. chem. Soc. 1951(III), 2397
- 21) Assarsson, G.O.:
Hydrothermal Reactions between Calcium Hydroxide and Amorphous Silica
The Reaktionen between 120 and 160°
J. phys. chem. (1958) 62, 223

- 22) Sytnik, L.W., Měedlov-Petrossian, O.P.:
Untersuchung der Kinetik der Wechselwirkung zwischen Ca(OH)_2
und Kieselgur unter den Bedingungen der hydrothermalen Behandlung
Silikattechnik (1971) 22, 17
- 23) Crăciunescu, L.:
Die Diffusion von Ionen durch Aluminiumhydroxid-Gel
Zement-Kalk-Gips (1969/4), 182

A n h a n g

Abbildungen
und Tabellen

Tabelle 5

Versuchsreihe	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5
Einwaage g	1,0162	1,0021	1,0090	1,0008	1,0003
Auswaage g	0,1510	0,1441	0,1820	0,1606	0,2081
Verlust g	0,8652	0,8580	0,8270	0,8402	0,7922
Verlust % d.E.	85,14	85,71	81,96	83,95	79,19

Tabelle 6

Versuchsreihe	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5
Einwaage g	1,0368	1,0014	1,0059	1,0157	1,0381
Auswaage g	0,7407	0,5789	0,5084	0,4391	0,3747
Verlust g	0,2961	0,4225	0,4975	0,5766	0,6634
Verlust % d.E.	28,55	42,19	49,46	56,77	63,91

Tabelle 7

Versuchsreihe	C	D	E	F	G
Einwaage g	0,9966	1,0140	1,0112	1,0090	1,0110
Auswaage g	0,0965	0,2338	0,3245	0,3446	0,3635
Verlust g	0,9001	0,7802	0,6867	0,6644	0,6475
Verlust % d.E.	90,32	76,94	67,91	65,85	64,05

Tabelle 8

Calcium

Versuchsserie A: C_3AH_6

Fraktion Nr.	A 1 kalkaggressive CO_2 : 0 mg/l Einwaage: 315,9 mg Ca				A 2 kalkaggressive CO_2 : 133 mg/l Einwaage: 311,6 mg Ca				A 3 kalkaggressive CO_2 : 178 mg/l Einwaage: 313,7 mg Ca				A 4 kalkaggressive CO_2 : 225 mg/l Einwaage: 313,4 mg Ca				A 5 kalkaggressive CO_2 : 278 mg/l Einwaage: 311,0 mg Ca			
	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage
1	10,5	6,9	6,9	2,2	10,5	10,7	10,7	3,4	10,5	10,8	10,8	3,4	10,8	13,8	13,8	4,4	10,4	6,7	6,7	2,16
2	11,2	9,9	16,8	5,3	11,0	10,8	21,5	6,9	11,1	11,3	22,0	7,0	10,8	13,6	27,4	8,8	11,0	18,1	24,8	7,99
3	11,3	13,1	29,9	9,5	11,1	10,9	32,4	10,4	11,1	10,9	32,9	10,5	11,0	12,4	39,8	12,8	11,0	12,6	37,3	12,0
4	11,4	9,4	39,3	12,4	11,1	10,7	43,1	13,8	11,0	9,8	42,7	13,6	11,1	13,3	53,1	17,1	11,0	10,3	47,6	15,3
5	11,4	11,0	50,3	15,9	11,1	10,3	53,4	17,2	11,0	9,1	51,8	16,5	10,9	12,2	65,3	21,0	10,0	7,3	54,9	17,7
6	11,4	11,4	61,7	19,5	11,1	10,7	64,2	20,6	11,0	8,7	60,5	19,3	10,9	12,0	77,2	24,8	7,5	9,8	64,7	20,2
7	11,4	11,4	73,1	23,1	11,0	8,6	72,7	23,3	11,0	8,7	69,3	22,1	10,9	11,4	88,6	28,5	7,6	8,3	73,0	23,5
8	11,0	8,5	81,6	25,8	10,9	7,8	80,5	25,8	11,0	9,3	78,5	25,0	10,7	9,9	98,5	31,7	7,2	8,1	81,1	26,1
9	11,2	6,7	88,3	28,0	10,9	6,7	87,2	28,0	11,0	10,4	88,9	28,3	10,5	6,1	104,6	33,6	7,1	8,6	89,7	28,9
10	11,2	5,4	93,7	29,7	10,0	6,3	93,4	30,0	10,8	8,7	97,6	31,1	8,1	4,3	108,9	35,0	7,1	8,8	98,5	31,7
11	11,4	5,8	99,5	31,5	10,4	6,6	100,0	32,1	10,7	9,3	106,9	34,1	7,7	4,2	113,0	36,3	7,2	8,3	106,9	34,4
12	11,3	5,5	105,0	33,2	10,6	6,1	106,1	34,1	10,7	8,7	115,7	36,9	7,5	4,4	117,4	37,7	7,1	8,3	115,1	37,1
13	11,3	5,7	110,7	35,0	10,5	5,8	111,9	35,9	10,6	7,0	122,7	39,1	7,3	4,3	121,6	39,1	7,2	8,4	123,5	39,8
14	11,2	- +)	-	-	10,5	5,5	117,4	37,7	10,2	3,5	126,1	40,2	7,2	4,5	126,1	40,5	7,0	7,8	131,4	42,3
15	11,2	5,7	116,3	36,8	10,5	5,1	122,4	39,3	8,6	3,2	129,3	41,2	7,0	4,2	130,3	41,9	7,3	7,9	139,3	44,9
16	11,1	5,3	121,6	38,5	10,6	5,6	128,0	41,1	7,9	4,6	133,8	42,7	7,0	4,4	134,7	43,3	7,3	6,7	146,0	47,0
17	10,2	5,2	126,8	40,1	10,5	5,7	133,7	42,9	7,5	4,9	138,8	44,2	7,0	3,9	138,5	44,5	7,1	8,1	154,1	49,6
18	10,8	4,8	131,6	41,7	10,5	4,3	138,0	44,3	7,4	4,2	142,9	45,6	7,0	3,7	142,2	45,7	7,4	6,6	160,7	51,7
19	11,1	4,8	136,5	43,2	9,7	2,1	140,1	45,0	7,4	4,4	147,3	47,0	7,0	4,0	146,2	47,0	7,4	7,1	167,8	54,0
20	10,9	4,0	140,5	44,5	8,3	2,3	142,4	45,7	7,4	4,2	151,4	48,3	7,1	4,6	150,8	48,5	7,4	6,8	174,7	56,3
21	10,8	4,7	145,2	46,0	8,3	2,0	144,4	46,4	7,4	4,0	155,4	49,5	7,1	4,6	155,3	49,9	7,1	7,1	181,8	58,5
22	10,9	4,1	149,3	47,3	7,6	3,0	147,4	47,3	7,4	3,8	159,1	50,7	7,1	4,7	160,0	51,4	7,4	8,3	190,1	61,2
23	10,9	3,2	152,5	48,3	7,7	2,6	150,1	48,2	7,2	3,7	162,8	51,9	6,9	4,6	164,6	52,9	7,2	7,2	197,3	63,5
24	10,9	4,2	156,7	49,6	7,6	2,7	152,8	49,1	7,3	3,9	166,7	53,1	7,2	3,9	168,4	54,1	7,2	7,2	204,5	65,8
25	10,9	2,9	159,6	50,5	7,5	2,7	155,6	49,9	7,1	4,1	170,7	54,4	7,1	4,6	173,0	55,6	7,1	7,4	211,8	68,2

Fraktion Nr.	A 1 kalkaggressive CO ₂ : 0 mg/l Einwaage: 315,9 mg Ca				A 2 kalkaggressive CO ₂ : 133 mg/l Einwaage: 311,6 mg Ca				A 3 kalkaggressive CO ₂ : 178 mg/l Einwaage: 313,7 mg Ca				A 4 kalkaggressive CO ₂ : 225 mg/l Einwaage: 313,4 mg Ca				A 5 kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 311,0 mg Ca			
	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage
26	10,9	2,8	162,4	51,4	7,6	3,4	158,9	51,0	7,4	4,6	175,3	55,9	7,0	4,4	177,4	57,6	7,2	6,7	218,5	70,4
27	10,2	3,4	165,8	52,5	7,3	2,9	161,9	52,0	7,4	3,4	178,6	56,9	7,0	4,6	181,9	58,5	7,2	6,7	225,2	72,5
28	10,3	3,0	163,8	53,4	7,4	2,9	164,8	52,9	7,2	2,9	181,5	57,9	6,9	4,6	186,5	60,0	7,2	6,8	232,0	74,7
29	10,6	2,7	171,5	54,3	7,5	2,8	167,6	53,8	7,4	2,9	184,5	58,8	6,9	4,7	191,2	61,5	7,0	7,5	239,6	77,2
30	10,8	2,8	174,3	55,2	7,6	2,9	170,6	54,8	7,6	2,5	187,0	59,6	6,8	5,2	196,4	63,1	6,9	8,2	247,8	79,8
31	10,8	2,5	176,8	56,0	7,5	2,9	173,5	55,7	7,5	2,8	189,9	60,5	7,0	6,0	202,4	65,0	6,9	8,0	255,8	82,4
32	10,8	3,2	180,0	57,0	7,4	2,7	176,3	56,6	7,2	3,9	193,7	61,8	6,9	5,6	208,0	66,8	6,8	7,7	263,5	84,8
33	10,8	3,0	183,0	57,9	7,4	2,7	177,0	57,5	7,2	3,8	197,5	63,0	6,8	4,9	212,9	68,4	7,0	8,2	271,7	87,5
34	10,8	3,0	186,1	58,9	7,3	2,8	181,8	58,4	7,0	3,6	201,0	64,1	6,8	4,5	217,3	69,9	7,0	8,2	279,9	90,1
35	10,7	3,0	189,1	59,9	7,3	2,6	184,5	59,2	7,0	3,9	204,9	65,3	6,9	4,9	222,3	71,4	6,9	7,7	287,6	92,6
36	10,8	3,0	192,1	60,8	7,4	2,9	187,4	60,2	7,2	3,8	208,6	66,5	7,0	4,8	227,0	73,0	6,9	5,7	293,3	94,4
37	10,0	2,6	194,7	61,6	7,2	3,0	190,5	61,1	7,2	3,6	212,2	67,7	6,9	5,1	232,1	74,6	6,6	3,1	296,4	95,4
38	10,7	2,5	197,2	62,4	7,5	2,5	193,0	61,9	7,1	3,8	216,0	68,8	6,9	4,6	236,7	76,1	6,8	3,1	299,5	96,4
39	10,6	2,7	199,9	63,3	7,5	2,6	195,6	62,8	7,2	4,0	219,9	70,1	7,1	5,4	242,1	77,8	6,4	1,0	300,5	96,8
40	10,7	2,4	202,2	64,0	7,6	2,4	198,0	63,6	7,1	4,2	224,1	71,4	6,8	4,5	246,5	79,2	6,4	0,6	301,1	97,0
41	10,7	2,0	204,3	64,7	7,5	2,5	200,5	64,3	7,3	3,7	227,7	72,6	6,8	4,4	250,9	80,6	6,9	0,7	301,3	97,2
42	10,6	1,9	206,2	65,3	7,3	2,5	202,9	65,1	7,1	4,2	231,9	73,9	6,8	4,1	254,9	81,9	6,6	0,4	302,2	97,3
43	10,6	1,4	207,6	65,7	7,4	2,5	205,4	65,9	7,1	3,9	235,8	75,2	6,9	4,1	259,0	83,2	6,8	0,7	303,0	97,6
44	10,6	1,4	209,0	66,1	7,4	2,8	208,3	66,9	7,0	4,1	239,8	76,5	7,1	4,1	263,1	84,5	6,1	0,1	303,1	97,6
45	10,7	1,4	210,4	66,6	7,3	2,8	211,0	67,7	7,0	3,8	243,6	77,6	7,0	3,5	266,5	85,7	6,7	-	303,1	97,6
46	10,7	2,5	212,9	67,4	7,5	2,4	213,4	68,5	7,0	3,8	247,4	78,9	6,9	3,2	269,7	86,7	7,2	-	303,1	97,6
47	9,7	1,5	214,4	67,9	7,4	2,6	216,0	69,3	7,2	4,1	251,5	80,2	6,9	2,4	272,2	87,5	6,2	0,4	303,5	97,7
48	10,2	1,5	215,9	68,3	7,4	2,0	218,0	70,0	7,0	4,1	255,5	81,5	6,9	2,8	275,0	88,4	6,8	0,5	304,0	97,9
49	10,6	1,2	217,1	68,7	7,5	2,2	219,1	70,3	7,1	4,1	259,6	82,8	6,7	2,3	277,3	89,1	6,6	0,2	304,2	98,0
50	10,6	1,3	218,3	69,1	7,4	0,9	220,0	70,5	7,1	5,4	265,0	84,5	6,5	2,3	279,7	89,9	6,7	0,3	304,5	98,0

Tabelle 9

Aluminium

Versuchsserie A: C_2AH_6

Fraktion Nr.	A 1 kalkaggressive CO_2 : 0 mg/l Einwaage: 149,0 mg Al				A 2 kalkaggressive CO_2 : 133 mg/l Einwaage: 146,9 mg Al				A 3 kalkaggressive CO_2 : 178 mg/l Einwaage: 147,9 mg Al				A 4 kalkaggressive CO_2 : 225 mg/l Einwaage: 146,7 mg Al				A 5 kalkaggressive CO_2 : 273 mg/l Einwaage: 146,6 mg Al			
	pH	μg	μg Σ	% der Einwaage	pH	μg	μg Σ	% der Einwaage	pH	μg	μg Σ	% der Einwaage	pH	μg	μg Σ	% der Einwaage	pH	μg	μg Σ	% der Einwaage
1	10,5	1.586	1.586	1,1	10,5	6.750	6.750	4,6	10,5	7.085	7.085	4,8	10,8	9.341	9.341	6,4	10,4	4.499	4.499	3,1
2	11,2	1.983	3.569	2,4	11,0	6.662	13.412	9,1	11,1	5.886	12.971	8,8	10,8	7.755	17.096	11,7	11,0	10.165	14.664	10,0
3	11,3	1.652	5.221	3,5	11,1	5.957	19.369	13,2	11,1	5.895	18.866	12,8	11,0	7.561	24.655	16,8	11,0	4.694	19.358	13,2
4	11,4	2.049	7.270	4,9	11,1	6.098	25.467	17,3	11,0	5.719	24.585	16,6	11,1	10.998	35.655	24,3	11,0	4.199	23.557	16,1
5	11,4	1.903	9.173	6,2	11,1	5.375	30.842	21,0	11,0	5.032	29.617	20,2	10,9	6.133	41.788	28,5	10,0	2.130	25.687	17,5
6	11,4	3.040	12.214	8,2	11,1	5.552	36.394	24,8	11,0	4.415	34.032	23,0	10,9	7.490	49.278	33,6	7,5	20	25.707	17,5
7	11,4	3.062	15.276	10,3	11,0	5.604	41.998	28,6	11,0	4.230	38.262	25,9	10,9	7.763	57.041	38,9	7,6	1	25.708	17,5
8	11,0	2.225	17.501	11,8	10,9	3.930	45.928	31,3	11,0	2.335	40.597	27,5	10,7	6.116	63.157	43,1	7,2	8	25.717	17,5
9	11,2	2.622	20.122	13,5	10,9	2.846	48.774	33,2	11,0	5.596	46.193	31,2	10,5	3.384	66.541	45,4	7,1	0	25.717	17,5
10	11,2	1.419	21.541	14,5	10,0	2.304	51.078	34,8	10,8	6.521	52.719	35,6	8,1	208	66.749	45,5	7,1	0	25.717	17,5
11	11,4	1.533	23.074	15,5	10,4	3.617	54.695	37,2	10,7	7.437	60.151	40,7	7,7	74	66.823	45,6	7,2	0	25.717	17,5
12	11,3	1.168	24.242	16,3	10,6	5.111	59.806	40,7	10,7	6.627	66.778	45,2	7,5	73	66.896	45,6	7,1	1	25.718	17,5
13	11,3	1.467	25.709	17,3	10,5	3.111	62.917	42,8	10,6	4.759	71.537	48,4	7,3	91	66.987	45,7	7,2	0	25.718	17,5
14	11,2	- +)	-	-	10,5	4.296	67.213	45,8	10,2	1.886	73.423	49,6	7,2	19	67.006	45,7	7,0	0	25.718	17,5
15	11,2	1.458	27.168	18,2	10,5	4.450	71.663	48,8	8,6	97	73.520	49,7	7,0	75	67.081	45,7	7,3	2	25.719	17,5
16	11,1	894	28.061	18,8	10,6	2.908	74.571	50,8	7,9	185	73.705	49,8	7,0	34	67.130	45,8	7,3	2	25.721	17,5
17	10,2	1.172	29.233	19,6	10,5	4.996	79.567	54,2	7,5	88	73.793	49,9	7,0	9	67.171	45,8	7,1	0	25.722	17,5
18	10,8	883	30.116	20,2	10,5	2.309	81.876	55,7	7,4	85	73.878	50,0	7,0	19	67.211	45,8	7,4	2	25.724	17,6
19	11,1	1.130	31.244	21,0	9,7	1.357	83.233	56,7	7,4	99	73.977	50,0	7,0	37	67.248	45,9	7,4	0	25.724	17,6
20	10,9	1.049	32.292	21,7	8,3	398	83.631	56,9	7,4	62	74.039	50,1	7,1	25	67.280	45,9	7,4	4	25.727	17,6
21	10,8	1.049	33.341	22,4	8,3	352	83.984	57,2	7,4	20	74.060	50,1	7,1	39	67.318	45,9	7,1	0	25.727	17,6
22	10,9	802	34.143	22,9	7,6	77	84.061	57,2	7,4	10	74.070	50,1	7,1	38	67.356	45,9	7,4	2	25.729	17,6
23	10,9	922	35.065	23,5	7,7	53	84.114	57,3	7,2	17	74.087	50,1	6,9	17	67.374	45,9	7,2	0	25.729	17,6
24	10,9	906	35.971	24,2	7,6	29	84.143	57,3	7,3	7	74.093	50,1	7,2	17	67.390	45,9	7,2	3	25.732	17,6
25	10,9	881	36.852	24,7	7,5	21	84.164	57,3	7,1	0	74.093	50,1	7,1	3	67.393	46,0	7,1	4	25.736	17,6

Fortsetzung Tabelle 9

Fraktion Nr.	A 1 kalkaggressive CO ₂ : 0 mg/l Einwaage: 149,0 mg Al				A 2 kalkaggressive CO ₂ : 133 mg/l Einwaage: 146,9 mg Al				A 3 kalkaggressive CO ₂ : 178 mg/l Einwaage: 147,9 mg Al				A 4 kalkaggressive CO ₂ : 225 mg/l Einwaage: 146,7 mg Al				A 5 kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 146,6 mg Al			
	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage
26	10,9	864	37.716	25,3	7,6	12	84.176	57,3	7,4	69	74.163	50,1	7,0	0	67.393	46,0	7,2	6	25.741	17,6
27	10,2	1.225	38.941	21,1	7,3	12	84.187	57,3	7,4	67	74.230	50,2	7,0	21	67.414	46,0	7,2	6	25.748	17,6
28	10,3	915	39.855	26,8	7,4	21	84.209	57,3	7,2	53	74.283	50,2	6,9	7	67.421	46,0	7,2	0	25.748	17,6
29	10,6	899	40.754	27,4	7,5	17	84.226	57,3	7,4	70	74.353	50,3	6,9	10	67.431	46,0	7,0	0	25.748	17,6
30	10,8	603	41.357	27,8	7,6	17	84.243	57,3	7,6	87	74.440	50,3	6,8	6	67.437	46,0	6,9	3	25.750	17,6
31	10,8	705	42.062	28,2	7,5	12	84.255	57,4	7,5	39	74.479	50,4	7,0	11	67.448	46,0	6,9	14	25.765	17,6
32	10,8	872	42.934	28,8	7,4	12	84.267	57,4	7,2	2	74.481	50,4	6,9	6	67.454	46,0	6,8	0	25.765	17,6
33	10,8	978	43.912	29,5	7,4	13	84.280	57,4	7,2	17	74.499	50,4	6,8	2	67.456	46,0	7,0	0	25.765	17,6
34	10,8	1.107	45.019	30,2	7,3	9	84.289	57,4	7,0	8	74.506	50,4	6,8	1	67.457	46,0	7,0	0	25.765	17,6
35	10,7	643	45.662	30,7	7,3	11	84.300	57,4	7,0	3	74.509	50,4	6,9	0	67.457	46,0	6,9	2	25.767	17,6
36	10,8	529	46.191	31,0	7,4	15	84.315	57,4	7,2	13	74.522	50,4	7,0	0	67.457	46,0	6,9	0	25.767	17,6
37	10,0	828	47.019	31,6	7,2	0	84.315	57,4	7,2	5	74.527	50,4	6,9	0	67.457	46,0	6,6	0	25.767	17,6
38	10,7	770	47.790	32,1	7,5	14	84.330	57,4	7,1	10	74.537	50,4	6,9	16	67.473	46,0	6,8	3	25.770	17,6
39	10,6	811	48.600	32,6	7,5	8	84.338	57,4	7,2	9	74.546	50,4	7,1	13	67.486	46,0	6,4	41	25.811	17,6
40	10,7	805	49.406	33,2	7,6	12	84.350	57,4	7,1	13	74.559	50,4	6,8	6	67.493	46,0	6,4	50	25.861	17,6
41	10,7	767	50.172	33,7	7,5	3	84.353	57,4	7,3	9	74.568	50,4	6,8	4	67.497	46,0	6,9	7	25.868	17,6
42	10,6	643	50.816	34,1	7,3	4	84.357	57,4	7,1	7	74.575	50,4	6,8	0	67.497	46,0	6,6	1	25.869	17,7
43	10,6	798	51.614	34,7	7,4	7	84.364	57,4	7,1	7	74.582	50,4	6,9	1	67.498	46,0	6,8	10	25.880	17,7
44	10,6	793	52.407	35,2	7,4	8	84.372	57,4	7,0	6	74.588	50,4	7,1	2	67.500	46,0	6,1	5	25.884	17,7
45	10,7	705	53.112	35,7	7,3	9	84.381	57,4	7,0	2	74.590	50,4	7,0	15	67.515	46,0	6,7	12	25.896	17,7
46	10,7	705	53.817	36,1	7,5	12	84.393	57,5	7,0	4	74.593	50,4	6,9	11	67.527	46,0	7,2	6	25.903	17,7
47	9,7	823	54.640	36,7	7,4	13	84.406	57,5	7,2	3	74.596	50,4	6,9	31	67.558	46,1	6,2	6	25.909	17,7
48	10,2	511	55.151	37,0	7,4	14	84.421	57,5	7,0	7	74.603	50,4	6,9	7	67.565	46,1	6,8	9	25.919	17,7
49	10,6	502	55.654	37,4	7,5	13	84.434	57,5	7,1	2	74.605	50,4	6,7	10	67.576	46,1	6,6	11	25.930	17,7
50	10,6	527	56.181	37,7	7,4	13	84.447	57,5	7,1	7	74.612	50,4	6,5	33	67.609	46,1	6,7	11	25.941	17,7

Tabelle 10

Calcium

Versuchsserie B: CSH-I

Fraktion Nr.	B 1 kalkaggressive CO ₂ : 0 mg/l Einwaage: 300,1 mg Ca				B 2 kalkaggressive CO ₂ : 133 mg/l Einwaage: 289,8 mg Ca				B 3 kalkaggressive CO ₂ : 178 mg/l Einwaage: 291,1 mg Ca				B 4 kalkaggressive CO ₂ : 225 mg/l Einwaage: 293,9 mg Ca				B 5 kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 300,4 mg Ca			
	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage
1	10,2	3,6	3,6	1,2	10,2	3,2	3,2	1,1	10,0	3,2	3,2	1,1	10,2	1,7	1,7	0,6	10,1	1,0	1,0	1,0
2	10,8	3,5	7,0	2,3	10,6	2,6	5,8	2,0	10,5	2,7	5,9	2,0	10,2	1,3	3,0	1,0	10,2	0,8	1,8	1,8
3	10,8	3,1	10,1	3,4	10,5	2,4	8,3	2,9	10,6	2,5	6,5	2,9	10,2	1,7	4,7	1,6	10,1	0,9	2,7	2,7
4	10,9	3,5	13,6	4,5	10,4	2,4	10,7	3,7	10,3	2,4	10,9	3,8	10,1	1,6	6,3	2,1	9,8	1,1	33,8	3,8
5	10,9	3,7	17,2	5,7	10,3	2,4	13,0	4,5	10,3	2,4	13,3	4,6	9,9	2,1	8,4	2,9	9,9	1,2	5,0	5,0
6	10,8	2,7	19,9	6,6	10,4	2,4	15,5	5,3	10,2	2,4	15,7	5,4	9,6	1,9	10,3	3,5	9,5	1,2	6,2	6,2
7	10,8	2,8	22,7	7,6	10,3	2,4	17,9	6,2	10,0	2,4	18,2	6,3	9,8	2,4	12,7	4,3	8,9	1,3	7,5	7,5
8	10,4	3,0	25,7	8,6	10,1	2,4	20,4	7,0	10,0	2,4	20,6	7,1	9,4	2,3	15,0	5,1	8,7	1,3	8,8	8,8
9	10,8	2,9	28,6	9,5	10,3	2,3	22,7	7,8	9,9	2,4	23,1	7,9	9,0	2,0	17,0	5,8	8,7	1,4	10,2	10,2
10	10,8	2,5	31,1	10,4	10,1	2,2	24,9	8,6	9,5	2,2	25,3	8,7	8,8	1,8	18,8	6,4	8,5	1,6	11,8	11,8
11	10,8	2,6	33,6	11,2	9,6	2,2	27,0	9,3	9,2	2,0	27,3	9,4	8,7	1,7	20,6	7,0	8,2	2,0	13,8	13,8
12	10,8	2,4	35,9	12,0	9,6	2,0	29,1	10,0	9,0	2,1	29,4	10,1	8,5	1,9	22,5	7,7	8,0	3,1	16,9	16,9
13	10,8	2,4	38,4	12,8	9,6	2,0	31,1	10,7	8,9	1,9	31,3	10,8	8,3	1,9	24,4	8,3	8,0	3,8	20,7	20,7
14	10,7	2,4	40,8	13,6	9,5	2,0	33,1	11,4	8,8	1,6	32,9	11,3	8,3	2,0	26,4	9,0	7,8	5,5	26,2	26,2
15	10,6	2,4	43,1	14,4	9,4	2,0	35,2	12,1	8,7	1,6	34,6	11,9	8,2	2,2	28,6	9,7	7,6	5,8	32,0	32,0
16	10,6	2,0	45,1	15,0	9,3	1,9	37,1	12,8	8,5	1,7	36,2	12,4	7,8	2,3	30,9	10,5	7,6	6,4	38,4	33,4
17	9,8	2,5	47,6	15,9	9,3	1,9	39,0	13,5	8,1	1,8	38,0	13,1	7,7	3,7	34,5	11,8	7,4	6,6	45,0	45,0
18	10,2	2,2	49,8	16,6	9,1	1,8	40,8	14,1	8,0	2,0	40,0	13,7	7,6	4,4	38,9	13,2	7,3	6,8	51,8	51,8
19	10,6	2,0	51,8	17,3	9,2	1,8	42,7	14,7	8,0	2,1	42,1	14,5	7,5	4,9	43,8	14,9	7,3	6,8	58,6	58,6
20	10,4	1,9	53,7	17,9	9,1	1,6	44,3	15,3	7,9	2,1	44,2	15,2	7,3	5,9	49,7	16,9	7,4	7,0	65,6	65,6
21	10,3	1,7	55,4	18,5	9,0	1,7	46,0	15,9	7,7	2,7	47,0	16,1	7,4	6,0	55,7	18,9	7,3	7,4	73,0	24,3
22	10,5	2,0	57,4	19,1	8,8	1,5	47,5	16,4	7,6	4,0	51,0	17,5	7,3	6,0	61,7	21,0	7,0	7,4	80,4	26,8
23	10,3	1,6	59,0	19,7	8,7	1,7	49,2	17,0	7,4	5,1	56,0	19,3	7,0	6,1	67,8	23,1	7,2	6,8	87,2	29,0
24	10,4	1,9	60,9	20,3	8,7	1,7	51,0	17,6	7,3	4,8	60,8	20,9	7,5	5,3	73,0	24,9	7,1	6,9	94,1	31,3
25	10,5	1,6	62,5	20,8	8,6	1,6	52,6	18,1	7,1	4,9	65,7	22,6	7,3	5,4	78,4	26,7	7,0	7,1	101,2	33,7

Fraktion Nr.	B 1 kalkaggressive CO ₂ : 0 mg/l Einwaage: 300,1 mg Ca				B 2 kalkaggressive CO ₂ : 133 mg/l Einwaage: 289,8 mg Ca				B 3 kalkaggressive CO ₂ : 178 mg/l Einwaage: 291,1 mg Ca				B 4 kalkaggressive CO ₂ : 225 mg/l Einwaage: 293,9 mg Ca				B 5 kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 300,4 mg Ca			
	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage
26	10,5	1,6	64,1	21,4	8,8	1,7	54,3	18,7	7,3	4,7	70,4	24,2	7,3	5,3	83,7	28,5	6,9	7,3	108,5	36,1
27	9,8	2,1	66,2	22,1	8,5	1,9	56,2	19,4	7,3	4,1	74,5	25,6	7,3	5,6	89,3	30,4	7,2	7,3	115,8	38,5
28	9,9	1,9	68,0	22,7	8,3	1,9	58,1	20,1	7,2	3,8	78,2	26,9	7,2	5,6	94,9	32,3	7,1	7,0	122,8	40,9
29	10,2	1,9	69,9	23,3	8,4	2,1	60,2	20,8	7,4	3,2	81,4	28,0	7,0	5,4	100,3	34,1	6,9	7,0	129,8	43,2
30	10,4	1,5	71,5	23,8	8,5	2,0	62,3	21,5	7,4	3,0	84,4	29,0	7,0	6,2	106,5	36,2	7,0	6,9	136,7	45,5
31	10,2	1,5	73,0	24,3	8,4	2,1	64,4	22,2	7,3	4,1	88,5	30,4	7,2	8,4	114,9	39,1	7,0	7,1	143,8	47,9
32	10,2	1,7	74,7	24,9	8,0	2,6	67,0	23,1	7,2	4,4	92,8	31,9	7,2	6,7	121,7	41,4	7,0	6,9	150,7	50,2
33	10,1	1,5	76,2	25,4	8,0	2,6	69,6	24,0	7,2	4,5	97,3	33,4	7,1	5,9	127,5	43,4	7,0	6,6	157,3	52,4
34	10,2	1,6	77,8	25,9	7,9	2,8	72,5	25,0	7,0	4,5	101,7	35,0	7,2	6,1	133,6	45,5	6,9	6,5	163,8	54,5
35	10,3	1,6	79,4	26,5	8,0	2,1	74,6	25,7	7,0	4,3	106,0	36,4	7,4	5,7	139,3	47,4	6,9	6,7	170,5	56,8
36	10,2	1,5	81,0	27,0	7,8	2,5	77,1	26,6	7,2	4,4	110,4	37,9	7,2	5,9	145,2	49,4	7,0	6,3	176,8	58,9
37	9,4	1,9	82,9	27,6	7,7	2,8	80,0	27,6	7,1	4,4	114,8	39,4	7,0	5,5	150,7	51,3	7,3	6,5	183,3	61,0
38	10,0	1,6	84,5	28,2	7,6	2,9	82,9	28,6	7,1	4,7	119,4	41,0	7,0	5,9	156,6	53,3	7,0	6,4	189,7	63,1
39	10,1	1,7	86,2	28,7	7,6	3,0	86,0	29,7	7,2	4,6	124,0	42,6	7,0	5,3	161,9	55,1	7,0	6,1	195,8	65,2
40	10,1	1,5	87,7	29,2	7,6	3,1	89,1	30,7	7,2	5,1	129,1	44,3	7,0	5,6	167,5	57,0	7,1	5,8	201,6	67,1
41	10,2	1,5	89,2	29,7	7,6	3,0	92,1	31,8	7,3	4,2	133,3	45,8	6,9	5,1	172,6	58,7	6,9	5,5	207,1	68,9
42	10,2	1,6	90,8	30,3	7,5	3,0	95,1	32,8	7,2	4,5	133,7	47,3	6,9	5,2	177,7	60,5	6,9	5,6	212,7	70,8
43	10,1	1,3	92,1	30,7	7,5	3,1	98,2	33,9	7,2	4,3	142,0	48,8	7,0	4,7	182,4	62,1	7,2	5,5	218,2	72,6
44	10,1	1,6	93,7	31,2	7,5	3,4	101,6	35,1	7,1	4,3	146,3	50,2	7,3	4,7	187,1	63,7	7,0	5,3	223,5	74,4
45	10,2	1,4	95,1	31,7	7,5	3,0	104,6	36,1	7,0	4,2	150,4	51,7	7,1	4,5	191,5	65,2	7,0	5,3	228,8	76,2
46	10,2	1,5	96,6	32,2	7,5	3,2	107,8	37,2	7,1	4,6	155,0	53,2	7,1	4,5	196,1	66,7	7,1	5,7	234,5	78,1
47	9,4	1,6	98,2	32,7	7,5	3,1	110,9	38,3	7,1	4,2	159,1	54,7	7,1	4,2	200,3	68,7	7,0	5,8	240,3	80,0
48	9,7	1,5	99,7	33,2	7,5	3,0	113,9	39,3	7,1	4,4	163,5	56,2	7,1	5,2	205,4	69,9	7,1	5,8	246,1	81,9
49	9,9	1,3	101,1	33,7	7,7	3,1	117,0	40,4	7,2	4,7	168,2	57,8	7,1	6,0	211,4	71,9	7,1	6,3	252,4	84,0
50	9,9	1,3	102,4	34,1	7,6	4,7	121,7	42,0	7,1	5,9	174,1	59,8	7,1	6,5	217,9	74,1	7,1	6,6	259,0	86,2

Tabelle 11

Silicium

Versuchsserie B: CSH

Fraktion Nr.	B 1 kalkaggressive CO ₂ : 0 mg/l Einwaage: 184,6 mg Si				B 2 kalkaggressive CO ₂ : 133 mg/l Einwaage: 178,2 mg Si				B 3 kalkaggressive CO ₂ : 178 mg/l Einwaage: 179,1 mg Si				B 4 kalkaggressive CO ₂ : 225 mg/l Einwaage: 180,8 mg Si				B 5 kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 184,7 mg Si			
	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage
1	10,2	941	941	0,5	10,2	1.078	1.078	0,6	10,0	1.352	1.352	0,8	10,2	1.279	1.729	1,0	10,1	1.401	1.401	0,8
2	10,8	748	1.689	0,9	10,6	1.048	2.126	1,2	10,5	1.348	2.699	1,5	10,2	1.754	3.033	1,7	10,2	2.216	3.617	2,0
3	10,8	740	2.429	1,3	10,5	1.228	3.354	1,9	10,6	1.497	4.197	2,3	10,2	2.353	5.385	3,0	10,1	3.003	6.620	3,6
4	10,9	690	3.119	1,7	10,4	1.369	4.723	2,7	10,3	1.797	5.993	3,6	10,1	2.793	8.178	4,5	9,8	3.604	10.224	5,5
5	10,9	706	3.824	2,1	10,3	1.561	6.284	3,5	10,3	2.006	8.000	4,5	9,9	3.298	11.476	6,3	9,9	4.032	14.256	7,7
6	10,8	770	4.594	2,5	10,4	1.694	7.978	4,5	10,2	2.160	10.160	5,7	9,6	3.797	15.273	8,4	9,5	4.588	18.844	10,2
7	10,8	786	5.380	2,9	10,3	1.998	9.976	5,6	10,0	2.417	12.577	7,0	9,8	4.043	19.315	10,7	8,9	4.791	23.635	12,8
8	10,4	859	6.239	3,4	10,1	2.242	12.218	6,9	10,0	2.811	15.387	8,6	9,4	4.342	23.657	13,1	8,7	4.898	28.533	15,4
9	10,8	572	6.871	3,7	10,3	2.498	14.716	8,2	9,9	3.281	18.669	10,4	9,0	5.080 ⁺	28.737	15,9	8,7	4.781	33.314	18,0
10	10,8	604	7.485	4,1	10,1	2.900	17.616	9,9	9,5	3.957	22.626	12,6	8,8	4.876 ⁺	33.613	18,6	8,5	4.706	38.020	20,6
11	10,8	691	8.176	4,4	9,6	2.706	20.322	11,4	9,2	4.203	26.829	15,0	8,7	4.513 ⁺	38.126	21,1	8,2	4.299	42.319	22,9
12	10,8	706	8.881	4,8	9,6	3.069	23.391	13,1	9,0	4.909	31.738	17,7	8,5	4.652	42.778	23,7	8,0	4.000	46.319	25,1
13	10,8	876	9.757	5,3	9,6	3.465	26.856	15,1	8,9	4.759	36.497	20,4	8,3	4.620	47.398	26,2	8,0	3.401	49.720	26,9
14	10,7	812	10.568	5,7	9,5	3.636	30.492	17,1	8,8	4.749	42.245	23,0	8,3	4.257	51.655	28,6	7,8	2.995	52.715	28,5
15	10,6	749	11.317	6,1	9,4	3.840	34.331	19,3	8,7	4.791	46.036	25,7	8,2	4.652 ⁺	56.307	31,1	7,6	2.404	55.119	29,8
16	10,6	898	12.215	6,6	9,3	4.032	38.363	21,5	8,5	4.738	50.774	28,4	7,8	3.572	59.879	33,1	7,6	1.998	57.117	30,9
17	9,8	1.103	13.318	7,2	9,3	4.460	42.823	24,0	8,1	4.556	55.330	30,9	7,7	3.273	63.151	34,9	7,4	1.801	58.918	31,9
18	10,2	926	14.244	7,7	9,1	4.331	47.154	26,5	8,0	4.225	59.554	33,3	7,6	2.813	65.964	36,5	7,3	1.741	60.659	32,8
19	10,6	936	15.180	8,2	9,2	4.513	51.667	29,0	8,0	4.225	63.779	35,6	7,5	2.139	68.103	37,7	7,3	1.420	62.079	33,6
20	10,4	981	16.161	8,8	9,1	4.438	56.105	31,5	7,9	3.989	67.768	37,9	7,3	1.925	70.028	38,7	7,4	1.382	63.461	34,4
21	10,3	1.005	17.166	9,3	9,0	3.904	60.008	33,7	7,7	2.995	70.762	39,5	7,4	1.767	71.795	39,7	7,3	1.249	64.710	35,0
22	10,5	971	18.137	9,8	8,8	4.438	64.446	36,2	7,6	2.725	73.487	41,0	7,3	1.685	73.480	40,6	7,0	1.087	65.797	35,6
23	10,3	862	18.999	10,3	8,7	4.631	69.077	38,8	7,4	2.331	75.818	42,3	7,0	1.463	74.943	41,5	7,2	1.001	66.798	36,2
24	10,4	1.037	20.036	10,9	8,7	4.385	73.461	41,2	7,3	1.814	77.632	43,4	7,5	2.113	77.057	42,6	7,1	969	67.767	36,7
25	10,5	964	20.999	11,4	8,6	4.331	77.792	43,6	7,1	1.720	79.352	44,3	7,3	1.343	78.400	43,4	7,0	922	68.689	37,2

Fraktion Nr.	B 1 kalkaggressive CO ₂ : 0 mg/l Einwaage: 184,6 mg Si				B 2 kalkaggressive CO ₂ : 133 mg/l Einwaage: 178,2 mg Si				B 3 kalkaggressive CO ₂ : 178 mg/l Einwaage: 179,1 mg Si				B 4 kalkaggressive CO ₂ : 225 mg/l Einwaage: 180,8 mg Si				B 5 kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 184,7 mg Si			
	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage
26	10,5	893	21.892	11,9	8,8	4.364	82.156	46,1	7,3	1.674	80.999	45,2	7,3	1.061	79.461	43,9	6,9	819	69.503	37,6
27	9,8	1.123	23.015	12,5	8,5	4.438	86.594	48,6	7,3	1.634	82.633	46,2	7,3	1.057	80.517	44,5	7,2	779	70.267	38,1
28	9,9	926	23.941	13,0	8,3	4.331	90.925	51,0	7,2	1.745	84.378	47,1	7,2	950	81.467	45,1	7,1	714	71.001	38,4
29	10,2	898	24.839	13,5	8,4	4.203	95.128	53,4	7,4	1.818	86.196	48,1	7,0	826	82.293	45,5	6,9	755	71.756	38,9
30	10,4	898	25.737	14,0	8,5	3.979	99.106	55,6	7,4	1.916	88.113	49,2	7,0	653	82.951	45,9	7,0	717	72.473	39,2
31	10,2	901	26.637	14,4	8,4	3.529	102.635	57,6	7,3	1.981	90.093	50,3	7,2	1.390	84.341	46,6	7,0	701	73.174	39,6
32	10,2	1.102	27.739	15,0	8,0	3.690	106.325	59,7	7,2	1.596	91.689	51,2	7,2	1.114	85.455	47,3	7,0	688	73.862	40,4
33	10,1	973	28.712	15,6	8,0	3.594	109.919	61,7	7,2	1.403	93.092	52,0	7,1	995	86.450	47,8	7,0	650	74.512	40,3
34	10,2	1.027	29.738	16,1	7,9	3.583	113.501	63,7	7,0	1.305	94.396	52,7	7,2	883	87.333	48,3	6,9	680	75.192	40,7
35	10,3	984	30.722	16,7	8,0	3.369	116.870	65,6	7,0	1.176	95.573	53,4	7,4	937	88.270	48,8	6,9	706	75.898	41,1
36	10,2	1.070	31.791	17,2	7,8	3.134	120.003	67,3	7,2	1.241	96.813	54,1	7,2	896	89.166	49,3	7,0	663	76.561	41,5
37	9,4	1.283	33.074	17,9	7,7	3.198	123.201	69,1	7,1	1.202	98.015	54,7	7,0	832	89.993	49,8	7,3	647	77.208	41,8
38	10,0	1.070	34.144	18,5	7,6	2.460	125.660	70,5	7,1	1.108	99.123	55,4	7,0	1.027	91.025	50,3	7,0	997	78.205	42,3
39	10,1	1.064	35.208	19,1	7,6	2.195	127.855	71,7	7,2	1.313	100.437	56,1	7,0	1.525	92.550	51,2	7,0	654	78.859	42,7
40	10,1	1.102	36.309	19,7	7,6	2.118	129.972	72,9	7,2	1.262	101.699	56,8	7,0	941	93.491	51,7	7,1	602	79.461	43,0
41	10,2	1.070	37.379	20,3	7,6	1.540	131.512	73,8	7,3	1.737	103.435	57,8	6,9	877	94.368	52,2	6,9	449	79.910	43,3
42	10,2	1.102	38.430	20,9	7,5	774	132.287	74,2	7,2	1.330	104.766	58,5	6,9	834	95.202	52,7	6,9	557	80.467	43,6
43	10,1	845	39.325	21,3	7,5	689	132.975	74,6	7,2	1.279	106.045	59,2	7,0	754	95.956	53,1	7,2	620	81.087	43,9
44	10,1	1.048	40.373	21,9	7,5	794	133.769	75,1	7,1	1.292	107.337	60,0	7,3	823	96.784	53,5	7,0	599	81.686	44,2
45	10,2	1.123	41.495	22,5	7,5	727	134.496	75,5	7,0	1.134	108.470	60,6	7,1	982	97.766	54,1	7,0	1.031	82.717	44,3
46	10,2	1.176	42.671	23,1	7,5	689	135.185	75,8	7,1	1.202	109.672	61,3	7,1	845	98.611	54,5	7,1	576	83.293	45,1
47	9,4	1.336	44.007	23,8	7,5	575	135.760	76,2	7,1	1.189	110.861	61,9	7,1	1.230	99.841	55,2	7,0	596	83.839	45,4
48	9,7	1.027	45.034	24,4	7,5	568	136.348	76,5	7,1	1.253	112.115	62,6	7,1	1.450	101.291	56,0	7,1	613	84.502	45,8
49	9,9	987	46.021	24,9	7,7	648	136.996	76,9	7,2	1.270	113.385	63,3	7,1	1.059	102.350	56,6	7,1	599	85.101	46,1
50	9,9	1.283	47.304	25,6	7,6	671	137.667	77,2	7,1	1.356	114.741	64,1	7,1	1.219	103.569	57,3	7,1	710	85.811	46,5

Tabelle 12

Versuchsserie H

γ -Al(OH)₃

Aluminium kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 354 mg Al									
Fraktion Nr.	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	Fraktion Nr.	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage
1	5,5	3,0	3,0	0	26	4,6	1,8	47,1	0,01
2	4,6	0	3,0	0	27	4,6	0,4	47,4	0,01
3	4,8	1,2	4,2	0	28	4,1	0,7	48,1	0,01
4	4,6	1,4	5,6	0	29	4,3	0,4	48,5	0,01
5	4,7	1,4	7,1	0	30	4,4	1,1	49,5	0,01
6	4,8	3,2	10,2	0	31	4,6	1,4	50,9	0,01
7	4,7	5,3	15,5	0	32	4,5	2,5	53,4	0,02
8	4,5	1,9	17,5	0	33	4,5	3,2	56,6	0,02
9	4,5	1,8	19,2	0,01	34	4,5	1,1	57,6	0,02
10	4,6	1,4	20,6	0,01	35	4,3	1,1	58,7	0,02
11	4,8	0	20,6	0,01	36	4,4	2,5	61,2	0,02
12	4,7	1,8	22,4	0,01	37	4,7	1,1	62,2	0,02
13	4,3	2,3	24,7	0,01	38	4,4	0,2	62,4	0,02
14	4,6	1,6	26,3	0,01	39	4,3	0	62,4	0,02
15	4,5	1,8	28,0	0,01	40	4,5	0	62,4	0,02
16	4,6	2,1	30,1	0,01	41	4,6	0,5	62,9	0,02
17	4,6	2,3	32,4	0,01	42	4,4	0,2	63,1	0,02
18	4,3	2,6	35,1	0,01	43	4,4	0,2	63,3	0,02
19	4,3	1,9	37,0	0,01	44	4,5	0,2	63,5	0,02
20	4,9	1,2	38,2	0,01	45	4,5	1,9	65,4	0,02
21	4,7	1,9	40,2	0,01	46	4,4	0,4	65,7	0,02
22	4,5	2,8	43,0	0,01	47	4,4	0,2	65,9	0,02
23	4,6	2,3	45,3	0,01	48	4,5	1,8	67,7	0,02
24	4,5	0	45,3	0,01	49	4,5	1,6	69,3	0,02
25	4,4	0	45,3	0,01	50	4,3	3,2	72,4	0,02

Tabelle 13

Versuchsserie C

$C_3AH_6 + CH = 433,3 \text{ mg} : 563,3 \text{ mg}$

Fraktion Nr.	Calcium				Aluminium			
	kalkaggressive CO_2 : 278 mg/l Einwaage: 439,3 mg Ca				kalkaggressive CO_2 : 278 mg/l Einwaage: 63,5 mg Al			
	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	μg	μg Σ	% der Einwaage
1	11,7	36,8	36,8	8,4	11,7	43	43	0,1
2	11,7	41,0	77,7	17,7	11,7	30	72	0,1
3	11,7	40,2	118,0	26,9	11,7	24	96	0,2
4	11,7	34,4	152,4	34,7	11,7	47	143	0,2
5	11,3	13,2	165,6	37,7	11,3	2.397	2.540	4,0
6	11,0	8,7	174,2	39,7	11,0	2.450	4.990	7,9
7	11,0	9,9	184,1	41,9	11,0	2.776	7.766	12,2
8	10,8	7,5	191,6	43,6	10,8	2.406	10.172	16,0
9	10,8	5,5	197,1	44,9	10,8	2.555	12.727	20,0
10	8,2	3,4	200,5	45,6	8,2	737	13.464	21,2
11	7,3	4,8	205,3	46,7	7,3	141	13.605	21,4
12	7,3	5,0	210,3	47,9	7,3	109	13.714	21,6
13	7,3	4,3	214,6	48,8	7,3	83	13.796	21,7
14	7,3	4,3	218,9	49,8	7,3	83	13.879	21,9
15	8,1	4,9	223,7	50,9	8,1	78	13.957	22,0
16	7,7	4,4	228,1	51,9	7,7	86	14.043	22,1
17	7,2	4,1	232,2	52,9	7,2	76	14.119	22,2
18	7,9	3,7	235,9	53,7	7,9	84	14.203	22,4
19	7,4	4,8	240,7	54,8	7,4	56	14.259	22,5
20	7,0	5,6	246,3	56,1	7,0	51	14.310	22,5
21	7,5	5,7	252,0	57,4	7,5	64	14.374	22,6
22	7,8	5,0	257,0	58,5	7,8	55	14.429	22,7
23	7,7	5,0	262,1	59,7	7,7	54	14.483	22,8
24	7,8	5,0	267,1	60,8	7,8	52	14.535	22,9
25	7,5	5,0	272,1	61,9	7,5	30	14.565	22,9

Fortsetzung Tabelle 13

Fraktion Nr.	Calcium				Aluminium			
	kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 439,3 mg Ca				kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 63,5 mg Al			
	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage
26	7,4	5,0	277,2	63,1	7,4	27	14.592	23,0
27	7,4	4,6	281,8	64,1	7,4	21	14.612	23,0
28	7,2	6,4	288,2	65,6	7,2	19	14.631	23,0
29	7,0	6,6	294,9	67,1	7,0	18	14.649	23,1
30	7,0	6,4	301,3	68,6	7,0	5	14.654	23,1
31	7,2	6,5	307,8	70,1	7,2	6	14.660	23,1
32	7,0	6,2	314,0	71,5	7,0	9	14.668	23,1
33	7,0	6,2	320,3	72,9	7,0	5	14.674	23,1
34	7,0	6,5	326,7	74,4	7,0	0	14.674	23,1
35	7,0	5,9	332,6	75,7	7,0	0	14.674	23,1
36	7,0	5,5	338,1	77,0	7,0	0	14.674	23,1
37	6,9	6,4	344,5	78,4	6,9	6	14.680	23,1
38	7,0	5,9	350,4	79,8	7,0	3	14.683	23,1
39	7,0	6,0	356,4	81,1	7,0	0	14.683	23,1
40	6,9	5,0	361,5	82,3	6,9	0	14.683	23,1
41	6,9	5,1	366,6	83,4	6,9	2	14.685	23,1
42	7,0	5,6	372,2	84,7	7,0	2	14.687	23,1
43	7,0	5,6	377,8	86,0	7,0	3	14.690	23,1
44	6,9	4,2	382,0	86,9	6,9	7	14.697	23,1
45	6,9	4,0	385,9	87,8	6,9	7	14.705	23,2
46	6,8	4,7	390,6	88,9	6,8	6	14.711	23,2
47	6,6	3,9	394,5	89,8	6,6	3	14.713	23,2
48	6,6	2,8	397,3	90,4	6,6	5	14.719	23,2
49	6,5	2,2	399,5	90,9	6,5	10	14.729	23,2
50	6,4	1,7	401,3	91,3	6,4	13	14.742	23,2

Tabelle 14

Versuchsserie D

CSH-I + CH = 650,0 mg : 364,0 mg

Fraktion Nr.	Calcium				Silicium			
	kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 385,0 mg Ca				kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 115,7 mg Si			
	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage
1	11,7	38,4	38,4	10,0	11,7	83	83	0,1
2	11,7	41,5	79,9	20,8	11,7	83	167	0,1
3	11,6	20,6	100,5	26,1	11,6	140	307	0,3
4	10,9	5,0	105,5	27,4	10,9	952	1.259	1,1
5	10,4	3,0	108,5	28,2	10,4	2.096	3.355	2,9
6	9,8	2,9	111,5	29,0	9,8	3.134	6.489	5,6
7	9,1	2,5	113,9	29,6	9,1	4.011	10.499	9,1
8	8,8	2,3	116,2	30,2	8,8	4.364	14.863	12,6
9	8,7	2,1	118,3	30,7	8,7	4.353	19.215	16,6
10	8,0	2,0	120,4	31,3	8,0	3.893	23.108	20,0
11	6,4	2,3	122,6	31,9	6,4	4.118	27.226	23,5
12	6,4	2,5	125,1	32,5	6,4	3.016	30.242	26,1
13	6,5	3,1	128,2	33,3	6,5	2.920	33.161	28,7
14	7,0	4,5	132,7	34,5	7,0	2.567	35.728	30,9
15	7,6	5,3	138,0	35,9	7,6	2.283	38.011	32,9
16	7,3	5,0	143,1	37,2	7,3	2.171	40.183	34,7
17	7,1	4,5	147,6	38,3	7,1	1.829	42.011	36,3
18	7,4	4,8	152,4	39,6	7,4	2.112	44.124	38,1
19	7,1	5,9	158,3	41,1	7,1	2.005	46.129	39,9
20	7,0	6,4	164,7	42,8	7,0	1.144	47.273	40,9
21	7,0	6,5	171,2	44,5	7,0	979	48.251	41,7
22	7,0	5,7	176,9	46,0	7,0	807	49.059	42,4
23	6,8	5,6	182,5	47,4	6,8	1.048	50.107	43,3
24	6,9	5,6	188,1	48,9	6,9	1.025	51.132	44,2
25	7,0	5,7	193,8	50,3	7,0	1.123	52.254	45,2

Fortsetzung Tabelle 14

Fraktion Nr.	Calcium				Silicium			
	kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 385,0 mg Ca				kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 115,7 mg Si			
	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage
26	7,0	6,0	199,8	51,9	7,0	930	53.185	46,0
27	7,0	6,1	205,9	53,5	7,0	1.123	54.308	46,9
28	6,8	7,1	213,0	55,3	6,8	1.711	56.019	48,4
29	6,6	7,4	220,4	57,3	6,6	2.203	58.222	50,3
30	6,6	6,1	226,5	58,9	6,6	770	58.992	51,0
31	6,9	7,3	233,8	60,7	6,9	1.005	59.997	51,9
32	6,7	7,0	240,8	62,6	6,7	824	60.821	52,6
33	6,8	6,8	247,6	64,3	6,8	729	61.550	53,2
34	6,6	5,6	253,2	65,8	6,6	952	62.502	54,0
35	6,6	6,4	259,6	67,4	6,6	995	63.497	54,9
36	6,6	6,2	265,8	69,0	6,6	989	64.486	55,7
37	6,5	7,1	272,9	70,9	6,5	920	65.406	56,5
38	6,4	4,7	277,6	72,1	6,4	1.198	66.603	57,6
39	6,5	5,5	283,1	73,5	6,5	930	67.534	58,4
40	6,5	4,8	287,9	74,8	6,5	963	68.496	59,2
41	6,5	4,6	292,5	76,0	6,5	1.048	69.544	60,1
42	6,5	4,6	297,2	77,2	6,5	840	70.384	60,8
43	6,5	4,6	301,8	78,4	6,5	822	71.206	61,5
44	6,4	4,1	305,9	79,5	6,4	866	72.072	62,3
45	6,4	4,0	309,8	80,5	6,4	884	72.957	63,1
46	6,5	8,2	318,0	82,6	6,5	1.157	74.114	64,1
47	6,4	5,4	323,4	84,0	6,4	551	74.665	64,5
48	6,3	4,9	328,2	85,3	6,3	417	75.082	65,0
49	6,3	4,6	332,8	86,5	6,3	330	75.412	65,2
50	6,5	3,9	336,7	87,5	6,5	471	75.883	65,6

Fraktion Nr.	Calcium				Aluminium				Silicium			
	kalkaggressive CO_2 : 278 mg/l Einwaage: 366,2 mg Ca				kalkaggressive CO_2 : 278 mg/l Einwaage: 34,3 mg Al				kalkaggressive CO_2 : 278 mg/l Einwaage: 89,0 mg Si			
	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	μg	μg Σ	% der Einwaage	pH	μg	μg Σ	% der Einwaage
1	11,1	37,1	37,1	10,1	11,1	13,8	13,8	0,04	11,1	62	62	0,1
2	11,3	14,9	52,0	14,2	11,3	22,9	36,7	0,11	11,3	321	383	0,4
3	9,4	3,2	55,2	15,1	9,4	14,1	50,8	0,15	9,4	2.374	2.757	3,1
4	9,4	2,3	57,5	15,7	9,4	3,2	53,9	0,16	9,4	3.262	6.019	6,8
5	9,4	2,4	59,9	16,4	9,4	0,5	54,5	0,16	9,4	3.583	9.602	10,8
6	9,0	2,1	62,0	16,9	9,0	0,5	55,0	0,16	9,0	3.743	13.345	15,0
7	8,3	2,4	64,4	17,6	8,3	1,1	56,0	0,16	8,3	3.529	16.874	19,0
8	6,9	3,8	68,2	18,6	6,9	0,4	56,4	0,16	6,9	3.176	20.051	22,5
9	6,9	4,4	72,6	19,8	6,9	3,2	59,6	0,17	6,9	2.620	22.671	25,5
10	6,5	5,9	78,5	21,4	6,5	3,2	62,7	0,18	6,5	2.112	24.783	27,9
11	6,4	5,6	84,0	23,0	6,4	4,1	66,8	0,19	6,4	1.172	25.955	29,2
12	6,6	5,2	89,2	24,4	6,6	6,3	73,1	0,21	6,6	980	26.935	30,3
13	6,6	5,4	94,6	25,8	6,6	2,5	75,6	0,22	6,6	937	27.872	31,3
14	6,7	5,4	99,9	27,3	6,7	0,4	76,0	0,22	6,7	743	28.615	32,2
15	6,7	5,4	105,3	28,8	6,7	1,4	77,4	0,23	6,7	872	29.486	33,1
16	6,6	4,4	109,7	30,0	6,6	0,7	78,1	0,23	6,6	747	30.233	34,0
17	6,9	5,8	115,5	31,5	6,9	2,5	80,5	0,23	6,9	896	31.129	35,0
18	6,5	4,4	119,9	32,7	6,5	5,1	85,7	0,25	6,5	802	32.803	35,9
19	6,6	5,3	125,1	34,2	6,6	4,1	89,7	0,26	6,6	877	32.803	36,9
20	6,5	7,0	132,1	36,1	6,5	1,8	91,5	0,27	6,5	871	33.679	37,8
21	6,3	6,4	138,5	37,8	6,3	1,6	93,1	0,27	6,3	818	34.497	38,8
22	6,3	5,6	144,1	39,4	6,3	1,8	94,8	0,28	6,3	764	35.260	39,6
23	6,5	5,9	150,0	41,0	6,5	0,5	95,4	0,28	6,5	642	35.902	40,3
24	6,5	4,8	154,8	42,3	6,5	0	95,4	0,28	6,5	624	36.526	41,0
25	6,6	4,9	159,7	43,6	6,6	1,8	97,1	0,28	6,6	590	37.116	41,7
26	6,5	3,9	163,6	44,7	6,5	4,8	101,9	0,30	6,5	624	37.739	42,4
27	6,5	5,4	169,0	46,2	6,5	4,4	106,3	0,31	6,5	599	38.338	43,1
28	6,9	5,3	174,2	47,6	6,9	4,6	110,9	0,32	6,9	570	38.908	43,7
29	6,6	4,9	179,2	48,9	6,6	4,1	114,9	0,34	6,6	526	39.434	44,3
30	6,4	3,8	183,0	50,0	6,4	22,0	136,9	0,40	6,4	182	39.616	44,5
31	6,7	3,2	186,2	50,9	6,7	0	136,9	0,40	6,7	108	39.724	44,6
32	6,7	4,9	191,2	52,2	6,7	0	136,9	0,40	6,7	183	39.907	44,8
33	6,3	5,4	196,5	53,7	6,3	1,4	138,4	0,40	6,3	212	40.119	45,1
34	6,3	4,7	201,2	55,0	6,3	2,8	141,2	0,41	6,3	190	40.309	45,3
35	6,8	4,7	206,0	56,2	6,8	3,5	144,7	0,42	6,8	167	40.476	45,5
36	6,7	4,9	210,9	57,6	6,7	0	144,7	0,42	6,7	182	40.658	45,7
37	6,6	4,7	215,6	58,9	6,6	1,9	146,6	0,43	6,6	139	40.797	45,8
38	6,7	4,7	220,4	60,2	6,7	2,6	149,3	0,44	6,7	136	40.932	46,0
39	6,3	4,4	224,8	61,4	6,3	3,0	152,3	0,44	6,3	126	41.059	46,1
40	6,3	5,5	230,3	62,9	6,3	0	152,3	0,44	6,3	186	41.245	46,3
41	6,5	4,3	234,6	64,1	6,5	0	152,3	0,44	6,5	112	41.357	46,5
42	6,7	4,5	239,1	65,3	6,7	0	152,3	0,44	6,7	100	41.457	46,6
43	6,7	4,4	243,5	66,5	6,7	0,2	152,5	0,44	6,7	92	41.549	46,7
44	6,9	4,7	248,2	67,8	6,9	0	152,5	0,44	6,9	90	41.639	46,8
45	6,7	4,2	252,4	68,9	6,7	0,2	152,6	0,45	6,7	75	41.714	46,9
46	6,5	4,1	256,5	70,1	6,5	0,4	153,0	0,45	6,5	74	41.787	47,0
47	6,5	3,9	260,4	71,1	6,5	0,5	153,5	0,45	6,5	75	41.862	47,0
48	6,5	4,4	264,8	72,3	6,5	0,7	154,2	0,45	6,5	86	41.948	47,1
49	6,6	4,1	268,9	73,4	6,6	1,2	155,4	0,45	6,6	73	42.020	47,2
50	6,3	5,7	274,6	75,0	6,3	0,7	156,2	0,46	6,3	90	42.110	47,3

Fraktion Nr.	Calcium kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 383,6 mg Ca				Aluminium kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 27,4 mg Al				Silicium kalkaggressive CO ₂ : 278 mg/l Einwaage: 81,2 mg Si			
	pH	mg	mg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage	pH	µg	µg Σ	% der Einwaage
1	11,3	28,7	28,7	7,5	11,3	2,8	2,8	0,01	11,3	76	76	0,1
2	11,3	12,7	41,4	10,8	11,3	22,4	25,2	0,09	11,3	306	382	0,5
3	11,1	6,4	47,7	12,4	11,1	12,7	37,9	0,14	11,1	749	1.130	1,4
4	10,3	3,8	51,5	13,4	10,3	4,6	42,5	0,16	10,3	1.176	2.307	2,8
5	9,5	2,6	54,1	14,1	9,5	3,2	45,7	0,17	9,5	2.053	4.360	5,4
6	8,2	3,8	57,8	15,1	8,2	3,5	49,2	0,18	8,2	1.925	6.285	7,7
7	7,7	6,9	64,7	16,9	7,7	3,7	52,9	0,19	7,7	2.246	8.531	10,5
8	7,0	9,8	74,5	19,4	7,0	1,4	54,3	0,20	7,0	1.711	10.242	12,6
9	7,5	6,8	81,3	21,2	7,5	0,7	55,0	0,20	7,5	1.433	11.675	14,4
10	7,1	6,5	87,7	22,9	7,1	0,4	55,3	0,20	7,1	1.096	12.772	15,7
11	7,1	7,0	94,7	24,7	7,1	0,2	55,5	0,20	7,1	1.005	13.777	17,0
12	7,1	7,1	101,8	26,6	7,1	0,5	56,0	0,20	7,1	642	14.419	17,8
13	6,7	7,0	108,8	28,4	6,7	0,5	56,6	0,21	6,1	526	14.945	18,4
14	7,0	7,0	115,8	30,2	7,0	0,2	56,8	0,21	7,0	513	15.458	19,0
15	7,3	7,0	122,8	32,0	7,3	0	56,8	0,21	7,3	465	15.923	19,6
16	7,2	6,9	129,7	33,8	7,2	0	56,8	0,21	7,2	431	16.354	20,1
17	7,1	6,9	136,6	35,6	7,1	0	56,8	0,21	7,1	412	16.766	20,7
18	6,7	6,4	143,0	37,3	6,7	0	56,8	0,21	6,7	390	17.156	21,1
19	6,8	6,3	149,3	38,9	6,8	0	56,8	0,21	6,8	364	17.520	21,6
20	6,9	8,1	157,4	41,0	6,9	0	56,8	0,21	6,9	604	18.124	22,3
21	6,9	5,5	162,8	42,5	6,9	0	56,8	0,21	6,9	305	18.429	22,7
22	6,6	5,4	168,2	43,9	6,6	0	56,8	0,21	6,6	249	18.678	23,0
23	6,7	5,8	174,0	45,4	6,7	0	56,8	0,21	6,7	232	18.910	23,3
24	6,9	7,2	181,3	47,3	6,9	0	56,8	0,21	6,9	230	19.140	23,6
25	6,6	6,4	187,6	48,9	6,6	0	56,8	0,21	6,6	196	19.336	23,8
26	6,7	6,1	193,7	50,5	6,7	0	56,8	0,21	6,7	166	19.501	24,0
27	6,6	5,3	199,0	51,9	6,6	0	56,8	0,21	6,6	198	19.699	24,3
28	6,6	5,2	204,2	53,2	6,6	0	56,8	0,21	6,6	166	19.865	24,5
29	6,5	5,2	209,4	54,6	6,5	0	56,8	0,21	6,5	160	20.025	24,7
30	6,5	4,9	214,2	55,9	6,5	0	56,8	0,21	6,5	144	20.169	24,9
31	6,6	4,8	219,1	57,1	6,6	0	56,8	0,21	6,6	139	20.308	25,0
32	6,5	4,8	223,9	58,4	6,5	0	56,8	0,21	6,5	137	20.445	25,2
33	6,6	4,7	228,6	59,6	6,6	0	56,8	0,21	6,6	128	20.574	25,3
34	6,6	4,8	233,4	60,9	6,6	0	56,8	0,21	6,6	119	20.692	25,5
35	6,5	4,7	238,2	62,1	6,5	0	56,8	0,21	6,5	108	20.800	25,6
36	6,4	4,6	242,8	63,3	6,4	0	56,8	0,21	6,4	105	20.905	25,8
37	6,6	4,7	247,5	64,5	6,6	0	56,8	0,21	6,6	100	21.006	25,9
38	6,5	4,8	252,3	65,8	6,5	0	56,8	0,21	6,5	96	21.102	26,0
39	6,6	4,7	257,0	67,0	6,6	0	56,8	0,21	6,6	96	21.198	26,1
40	6,4	4,6	261,7	68,2	6,9	0	56,8	0,21	6,4	91	21.289	26,2
41	6,6	4,9	266,5	69,5	6,6	0	56,8	0,21	6,6	110	21.399	26,4
42	6,5	4,8	271,3	70,7	6,5	0	56,8	0,21	6,5	93	21.492	26,5
43	6,5	4,8	276,1	72,0	6,5	0	56,8	0,21	6,5	81	21.573	26,6
44	6,5	4,5	280,6	73,0	6,5	0	56,8	0,21	6,5	76	21.649	26,7
45	6,5	4,4	285,0	74,3	6,5	0	56,8	0,21	6,5	77	21.726	26,8
46	6,4	4,4	289,4	75,5	6,4	0	56,8	0,21	6,4	73	21.799	26,9
47	6,5	4,5	294,0	76,6	6,5	0	56,8	0,21	6,5	68	21.867	26,9
48	6,5	4,4	298,4	77,8	6,5	0	56,8	0,21	6,5	64	21.931	27,0
49	6,5	4,3	302,7	78,9	6,5	0	56,8	0,21	6,5	59	21.990	27,1
50	6,5	5,1	307,7	80,2	6,5	1,1	57,8	0,21	6,5	68	22.058	27,2

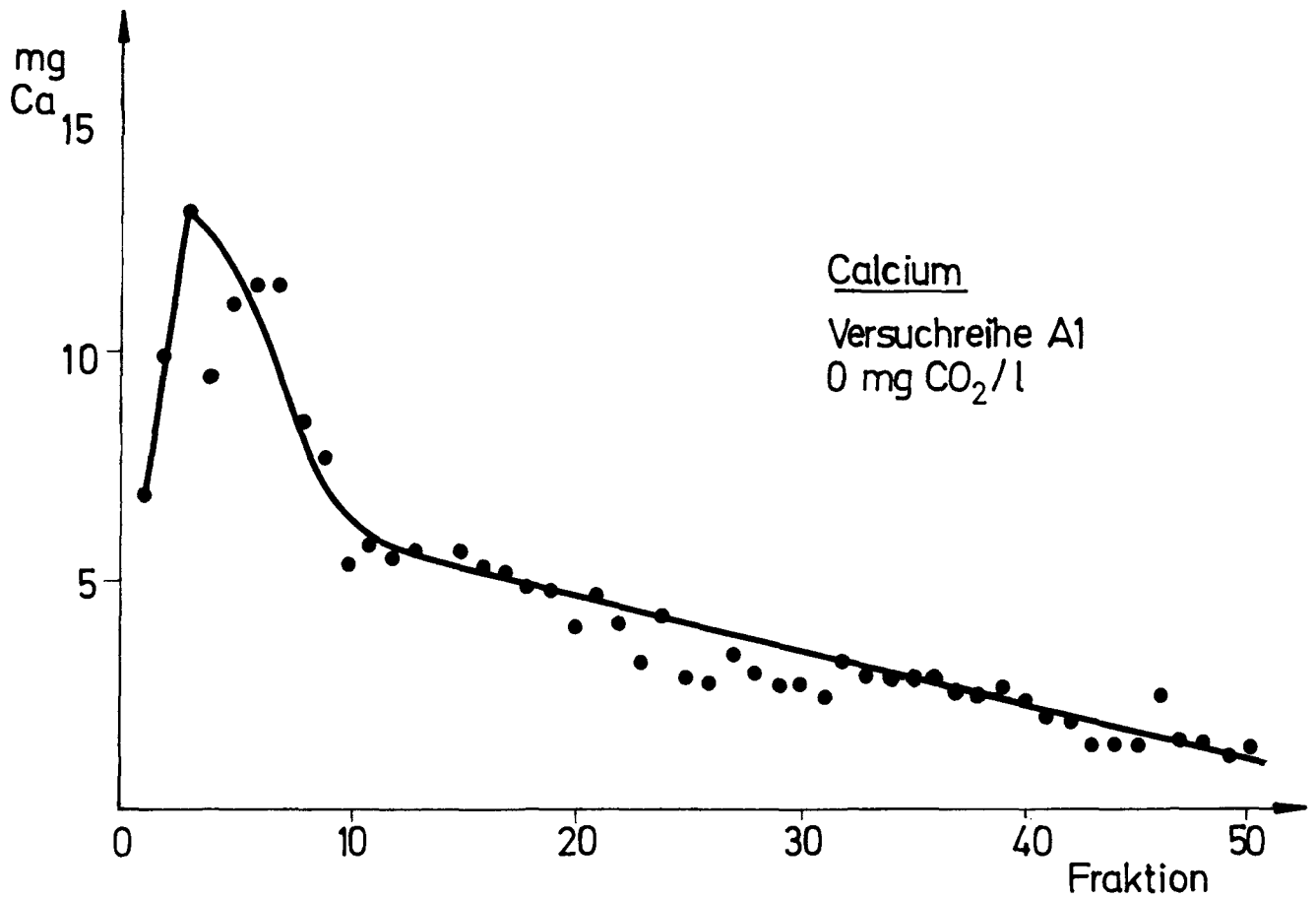


Abb: 4

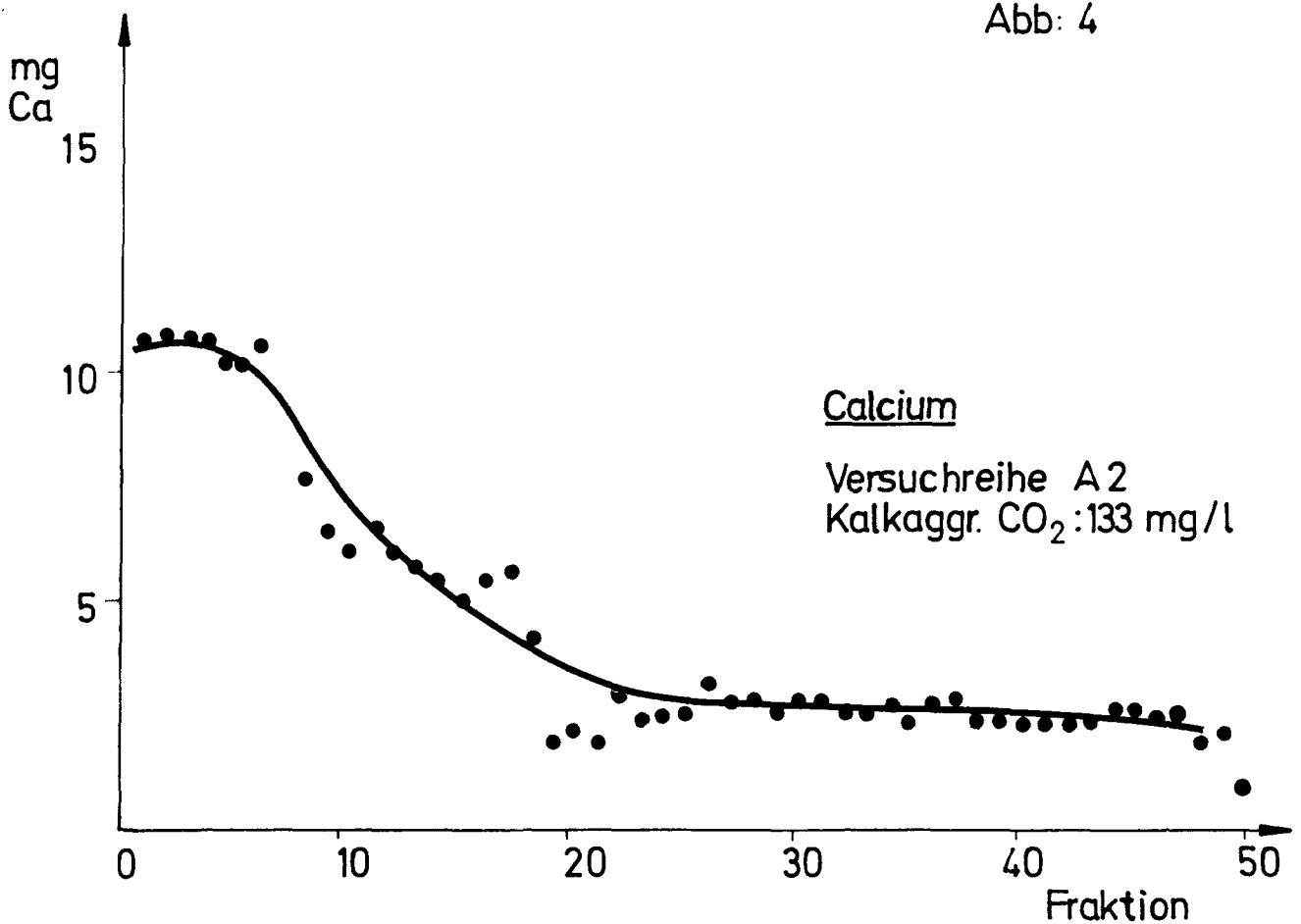


Abb: 5

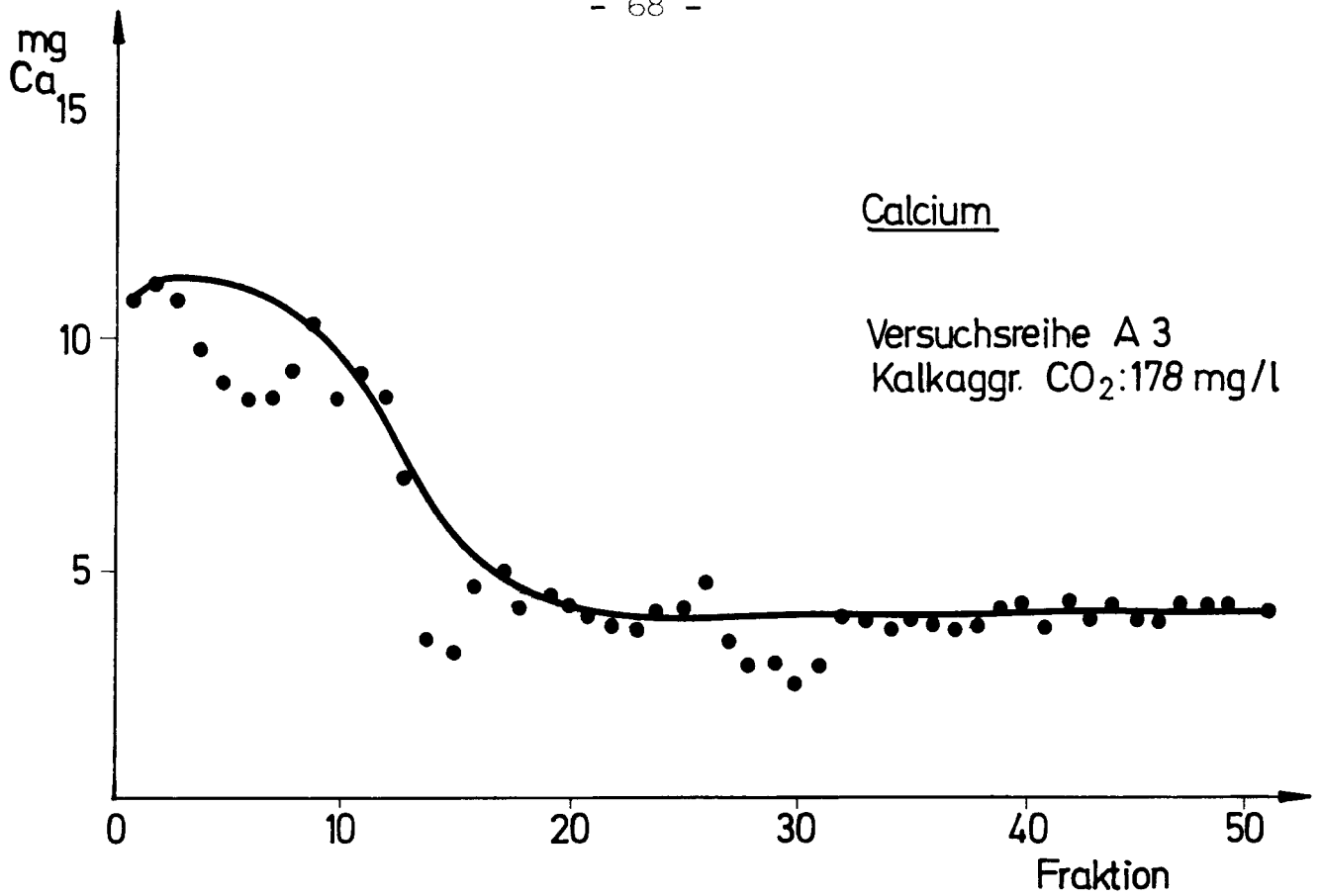


Abb: 6

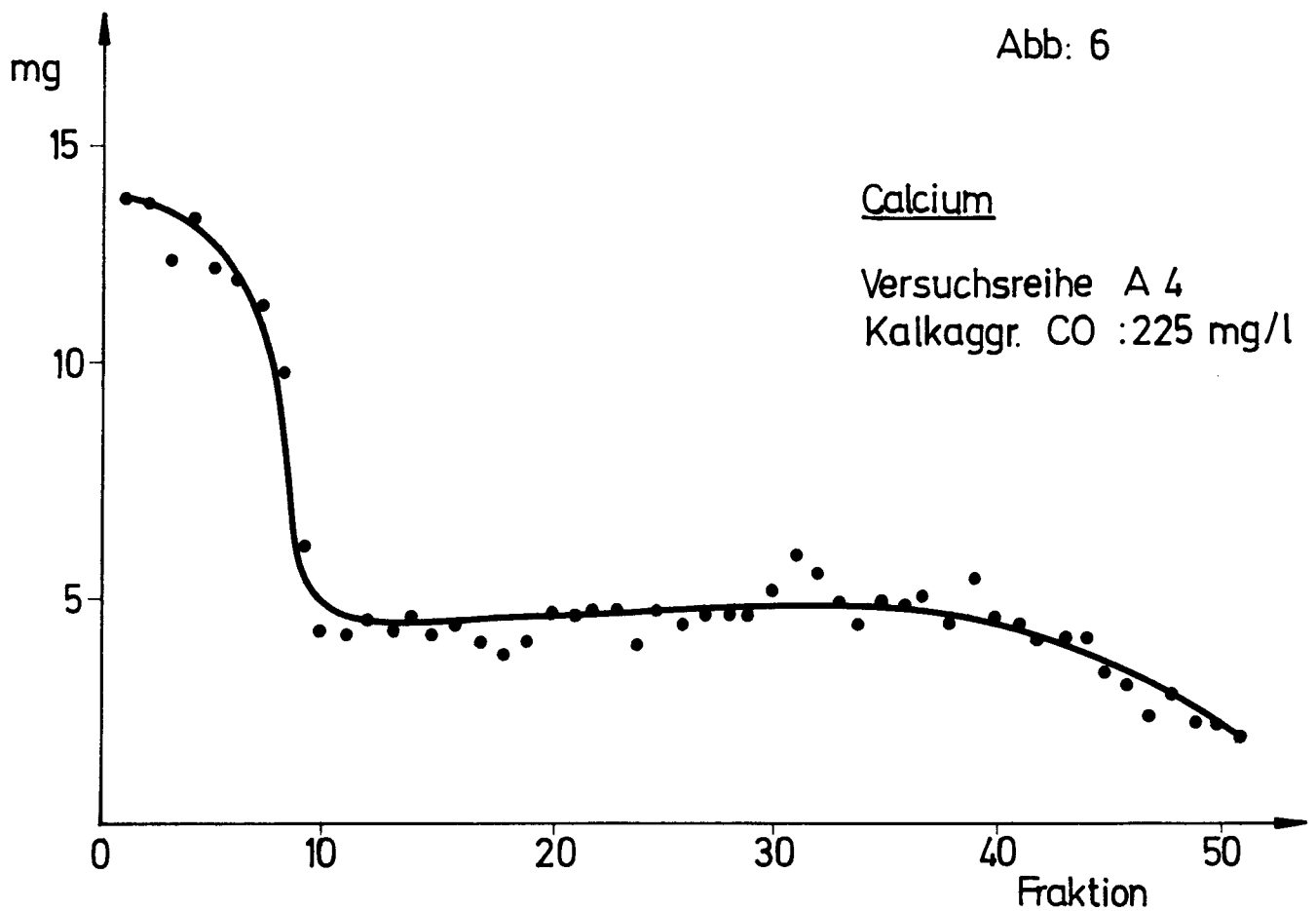


Abb: 7

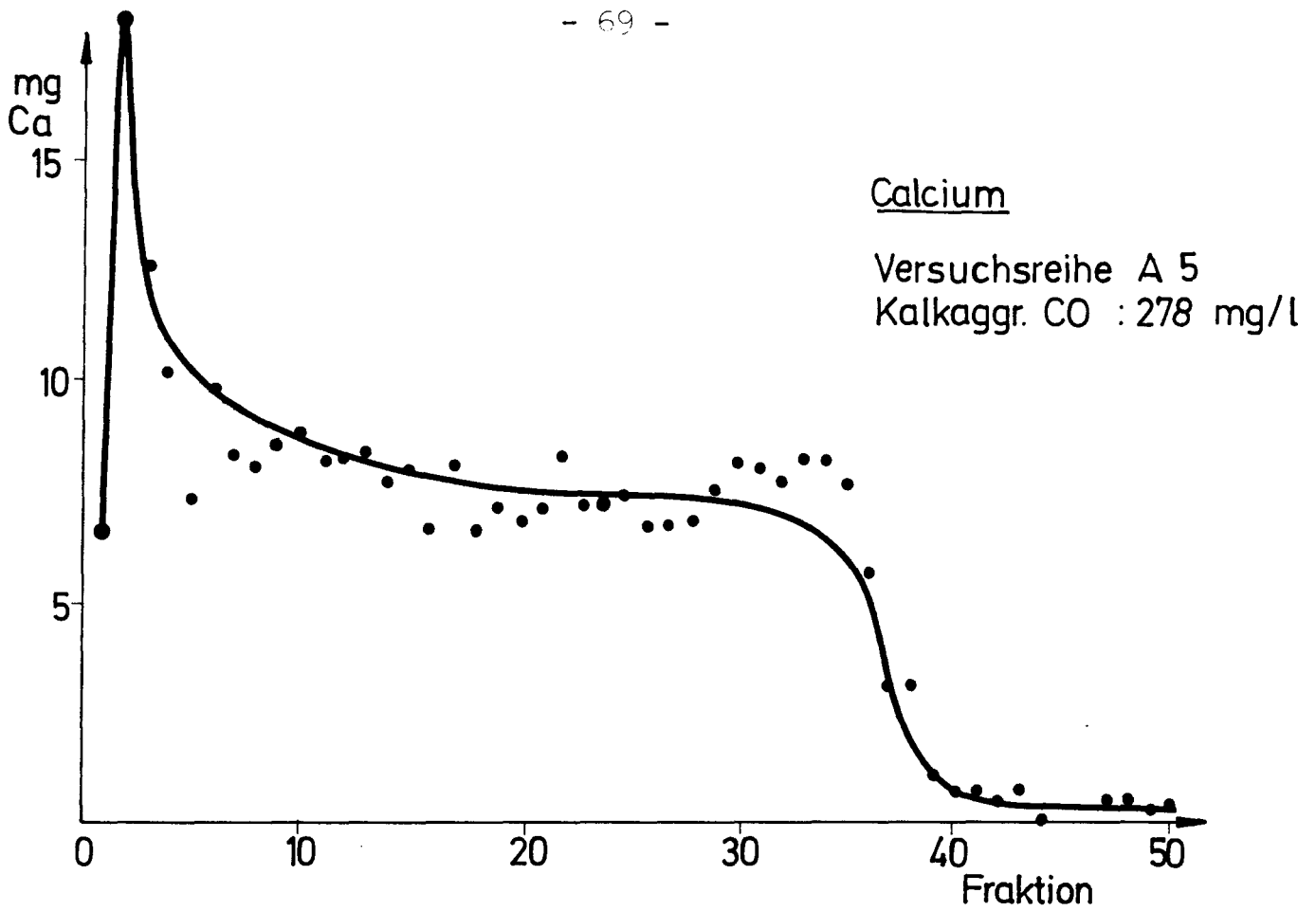


Abb: 8

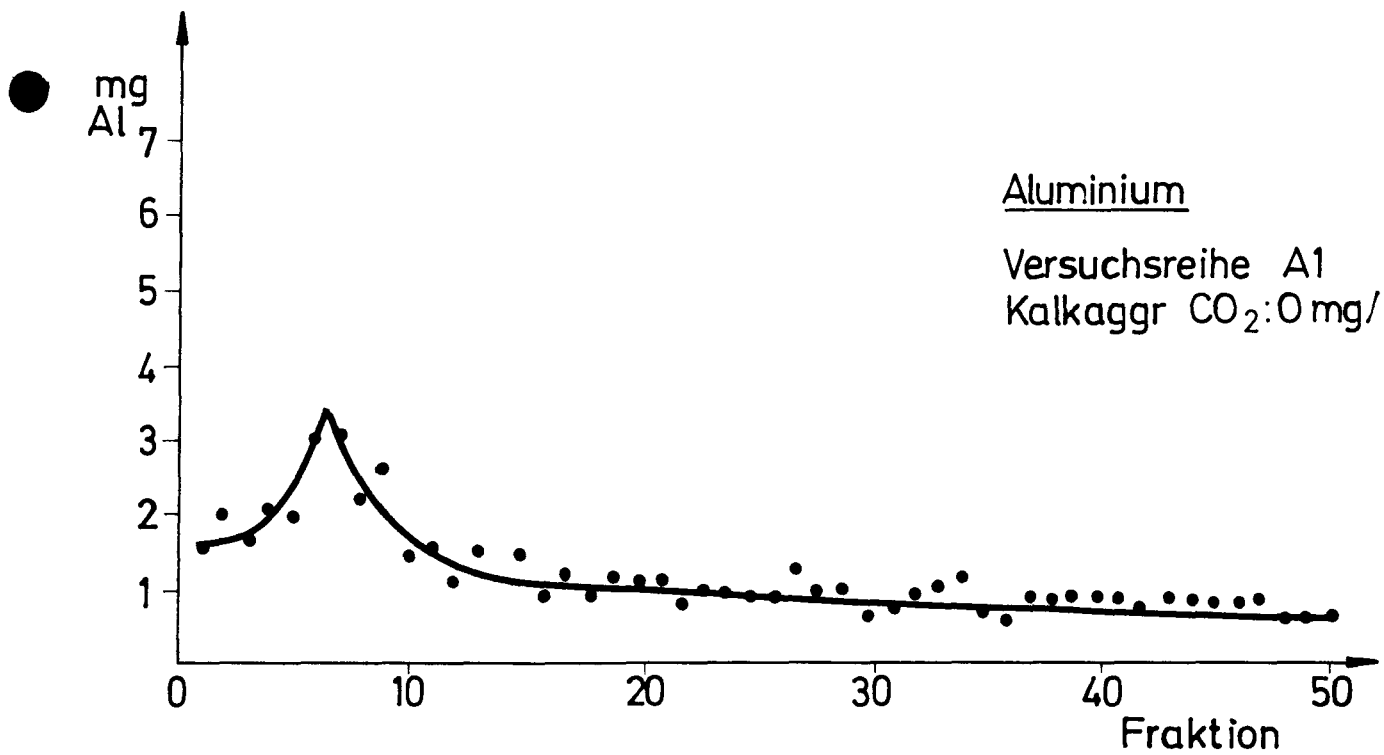


Abb: 9

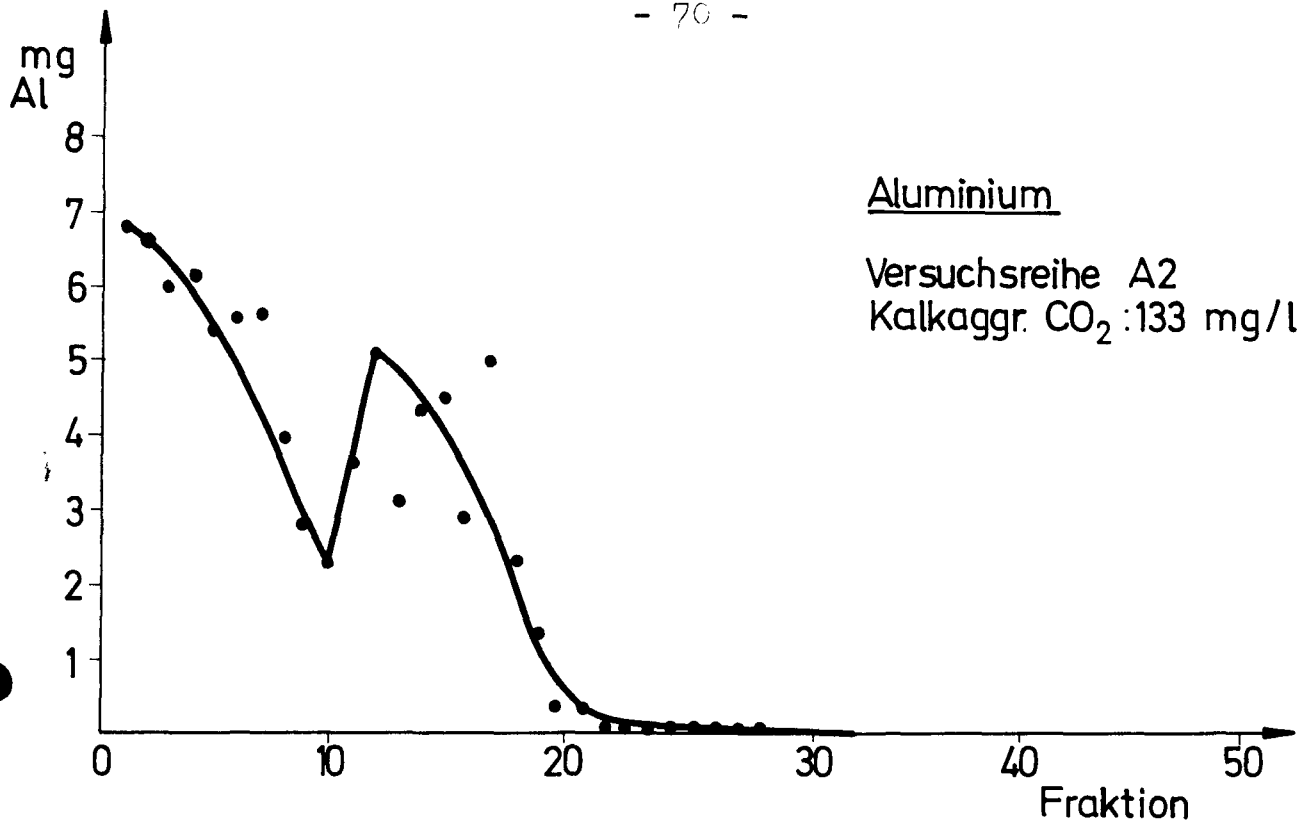


Abb: 10

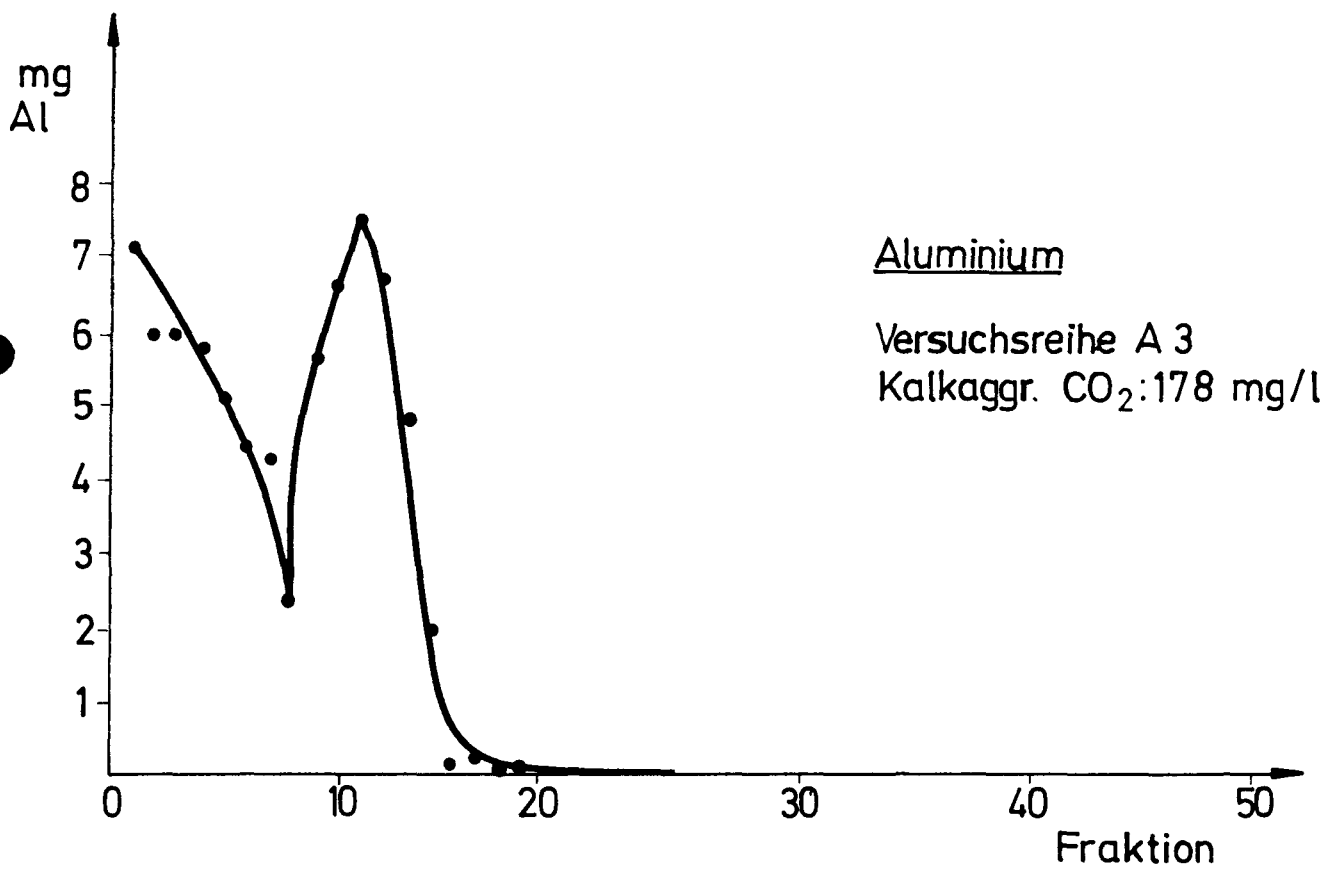


Abb: 11

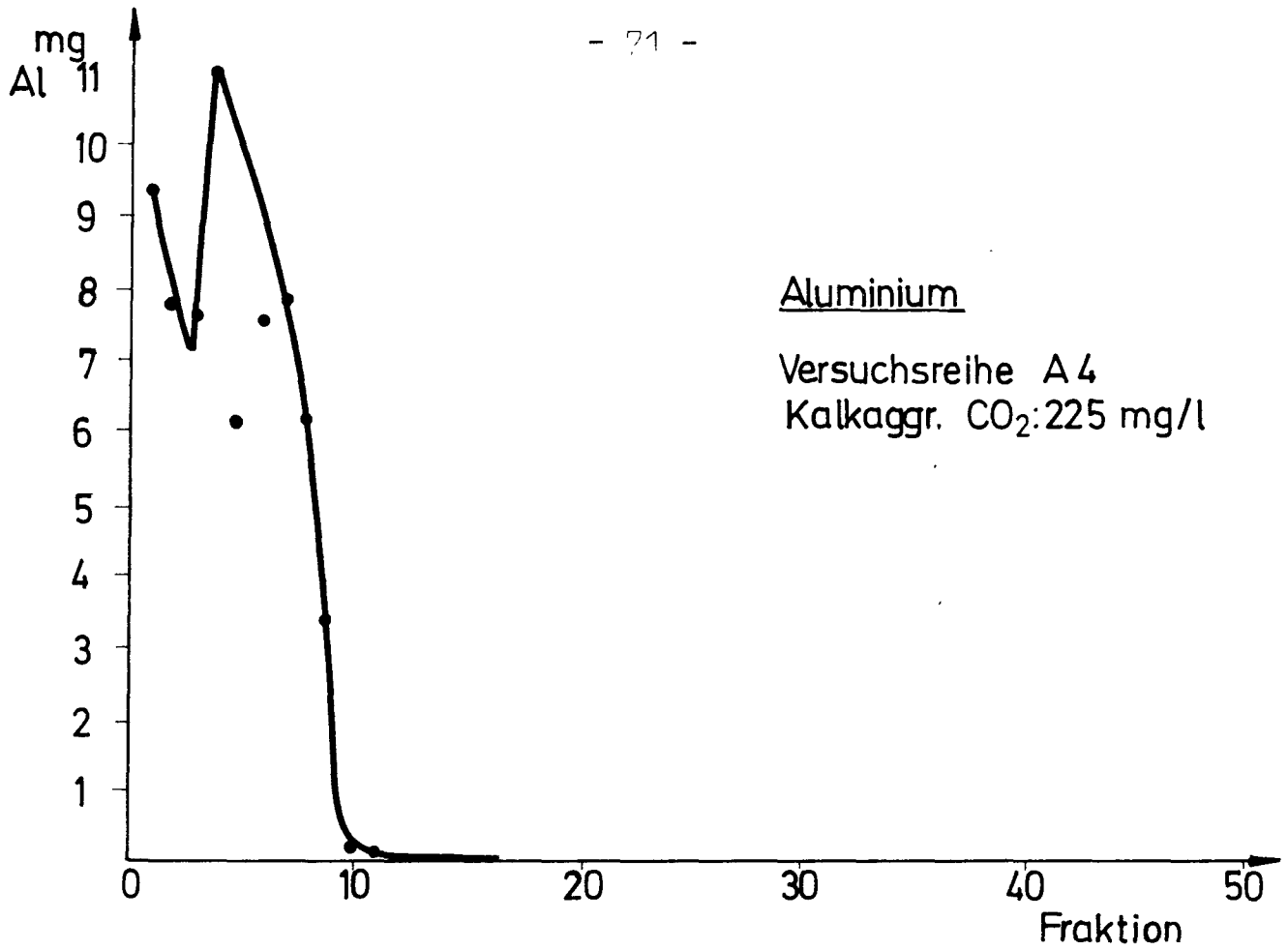


Abb: 12

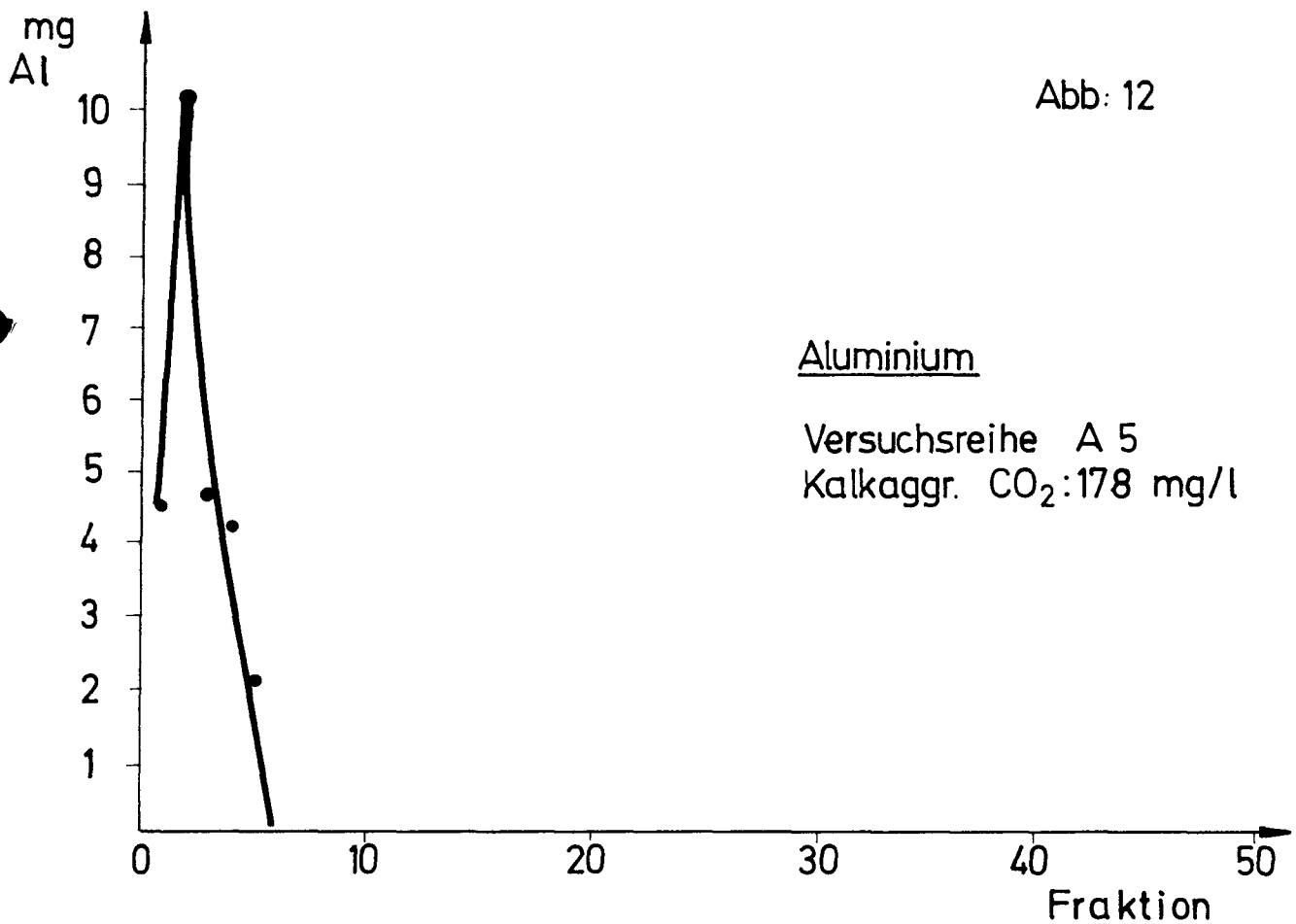


Abb: 13

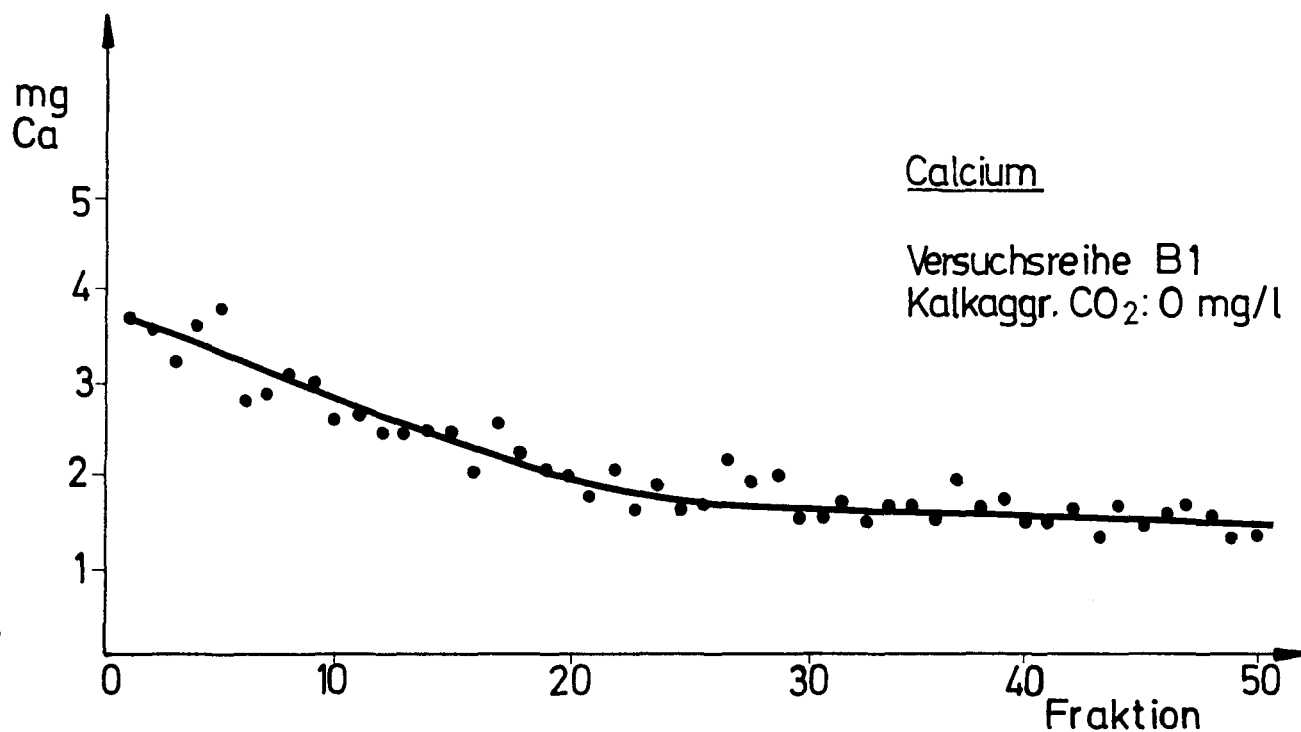


Abb: 14

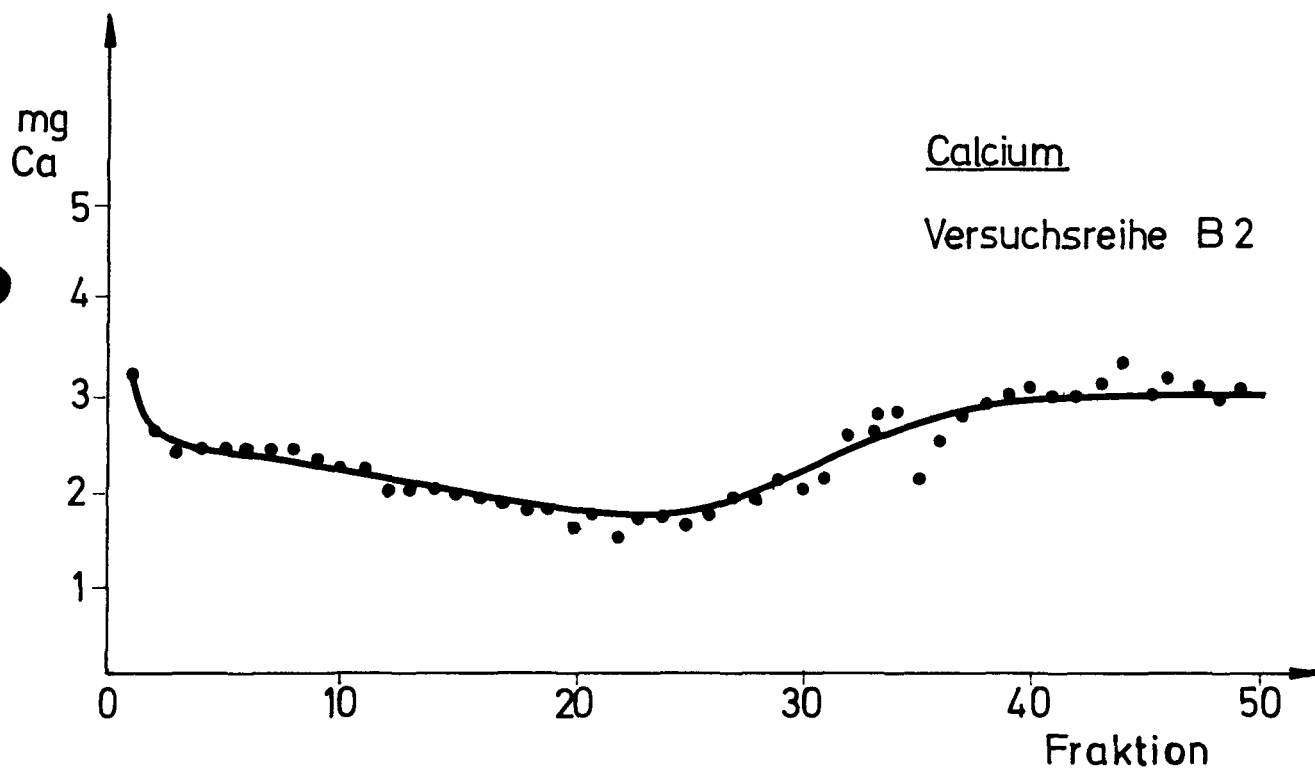


Abb: 15

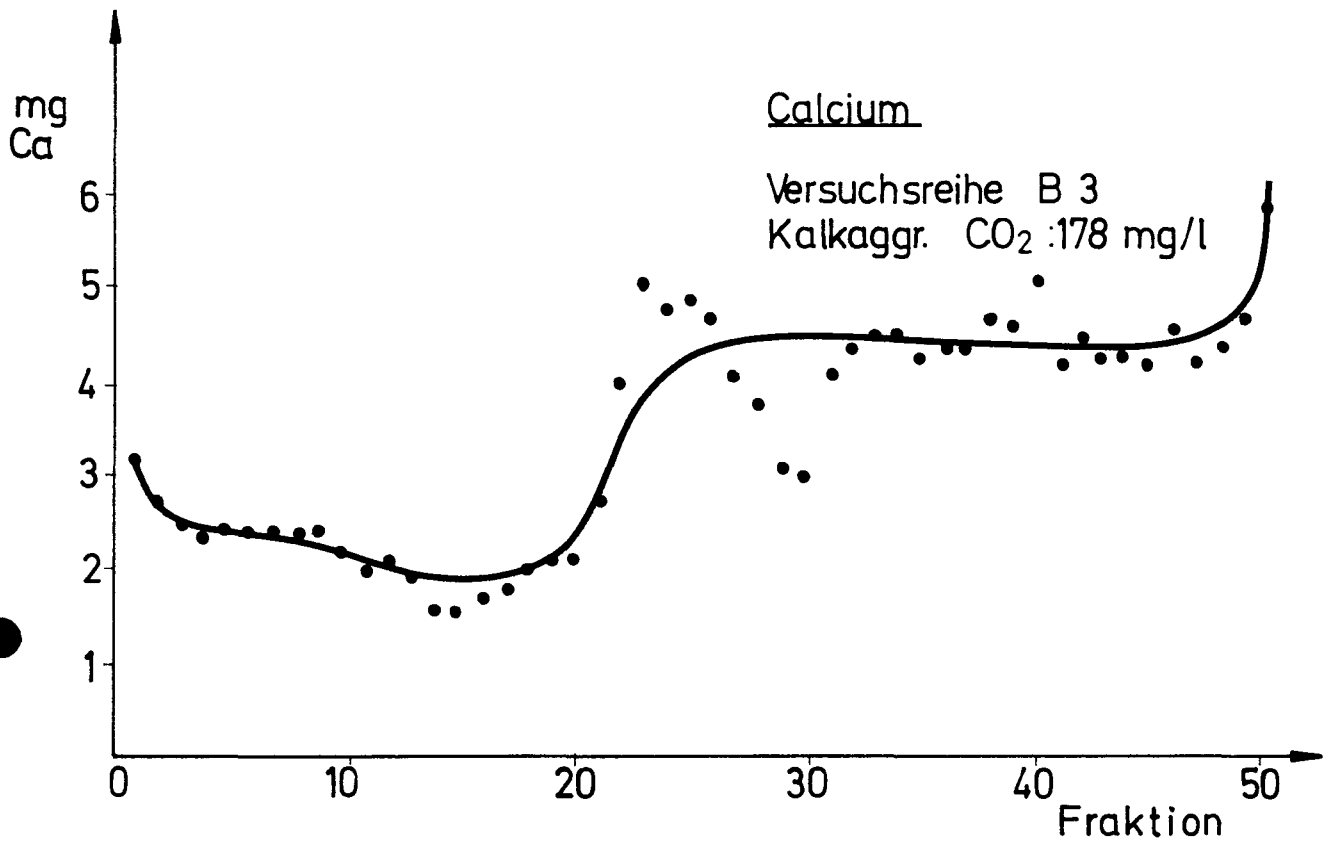


Abb: 16

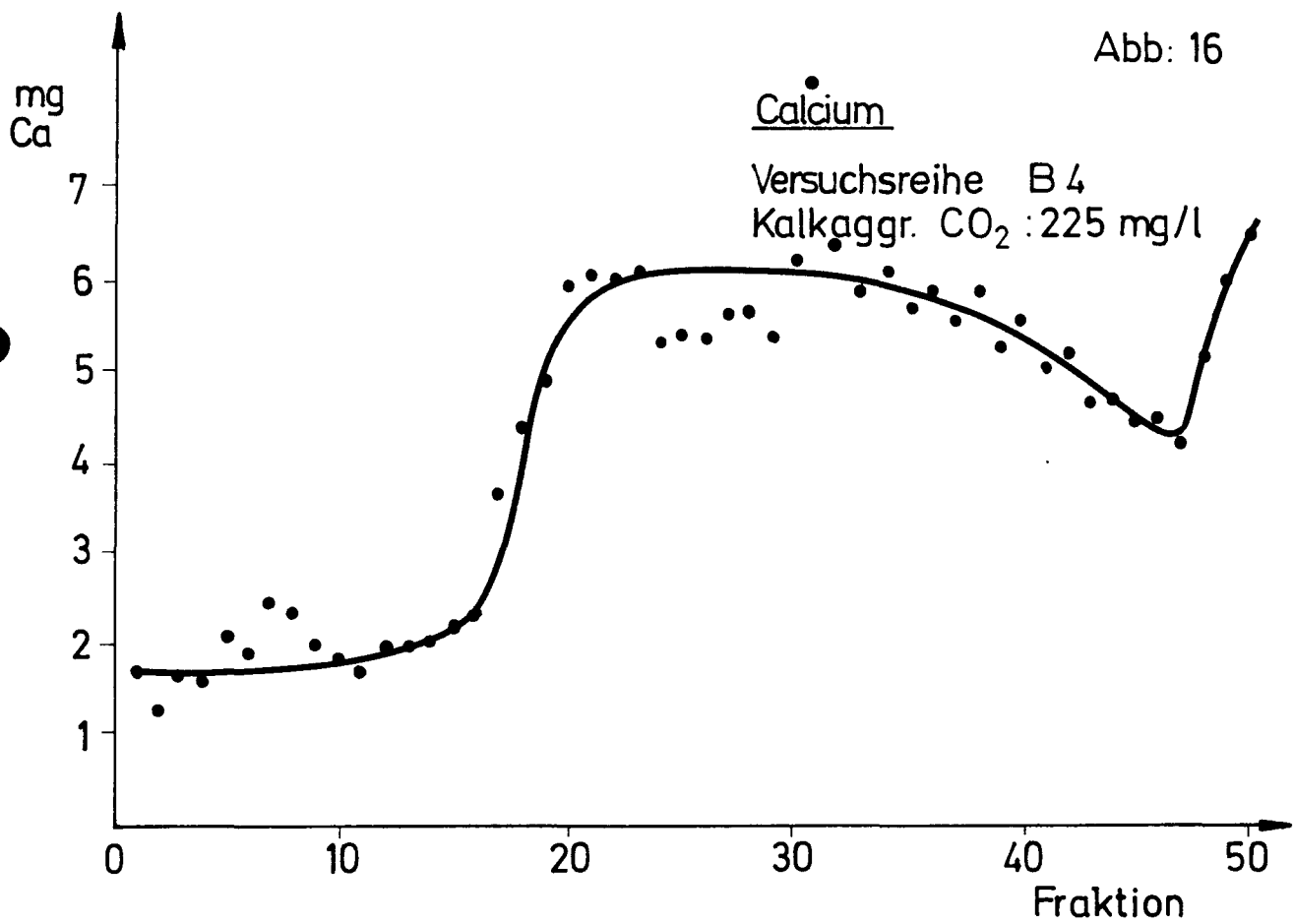


Abb 17

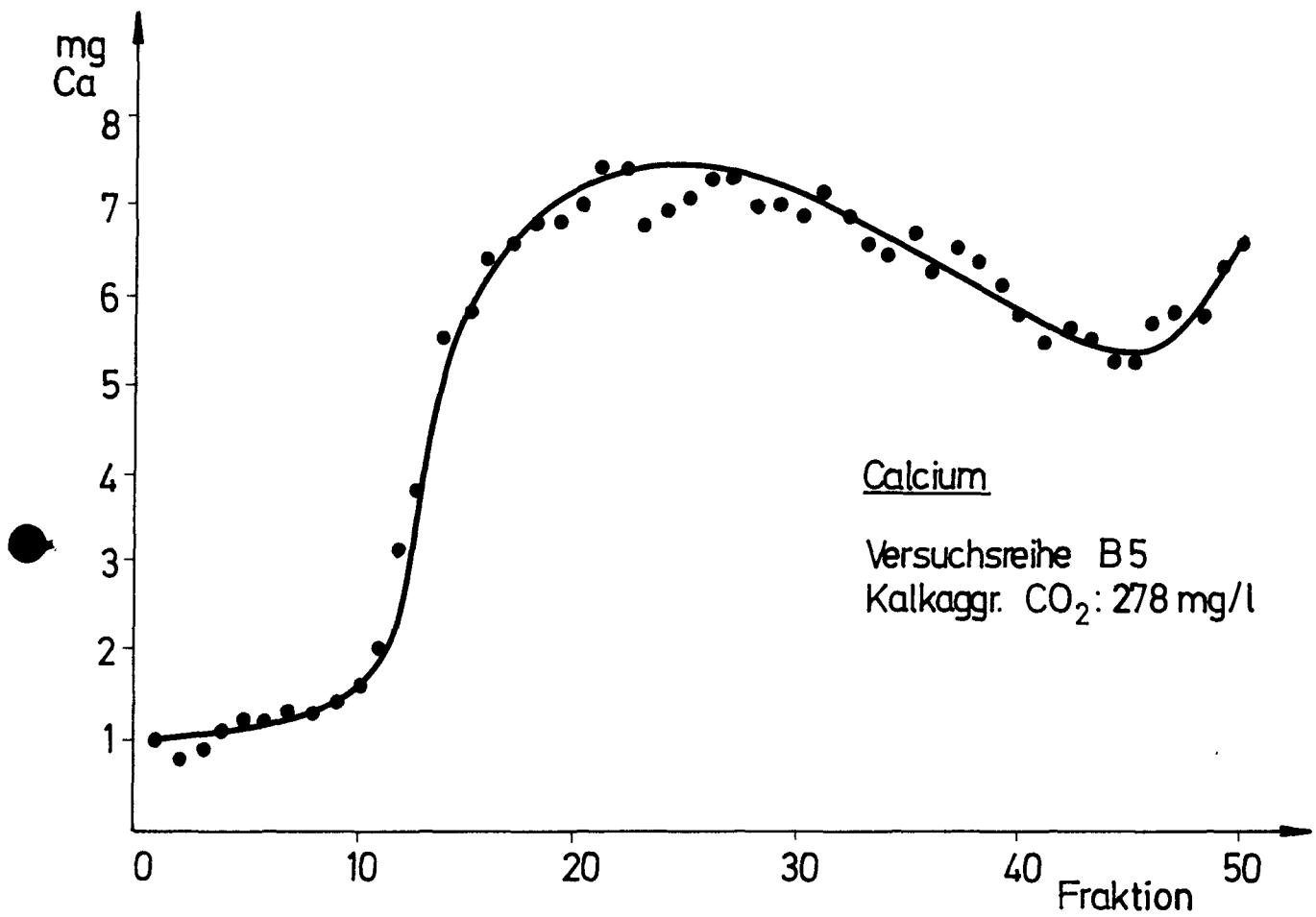


Abb: 18

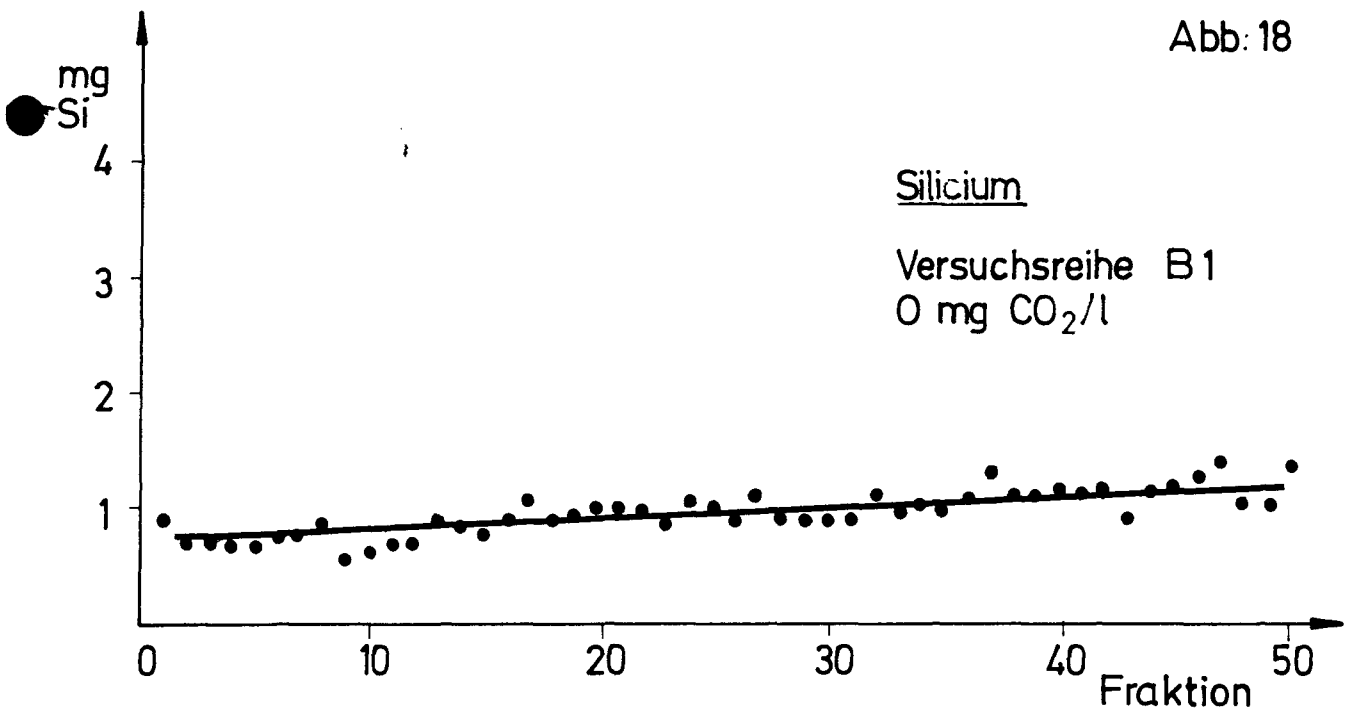


Abb: 19

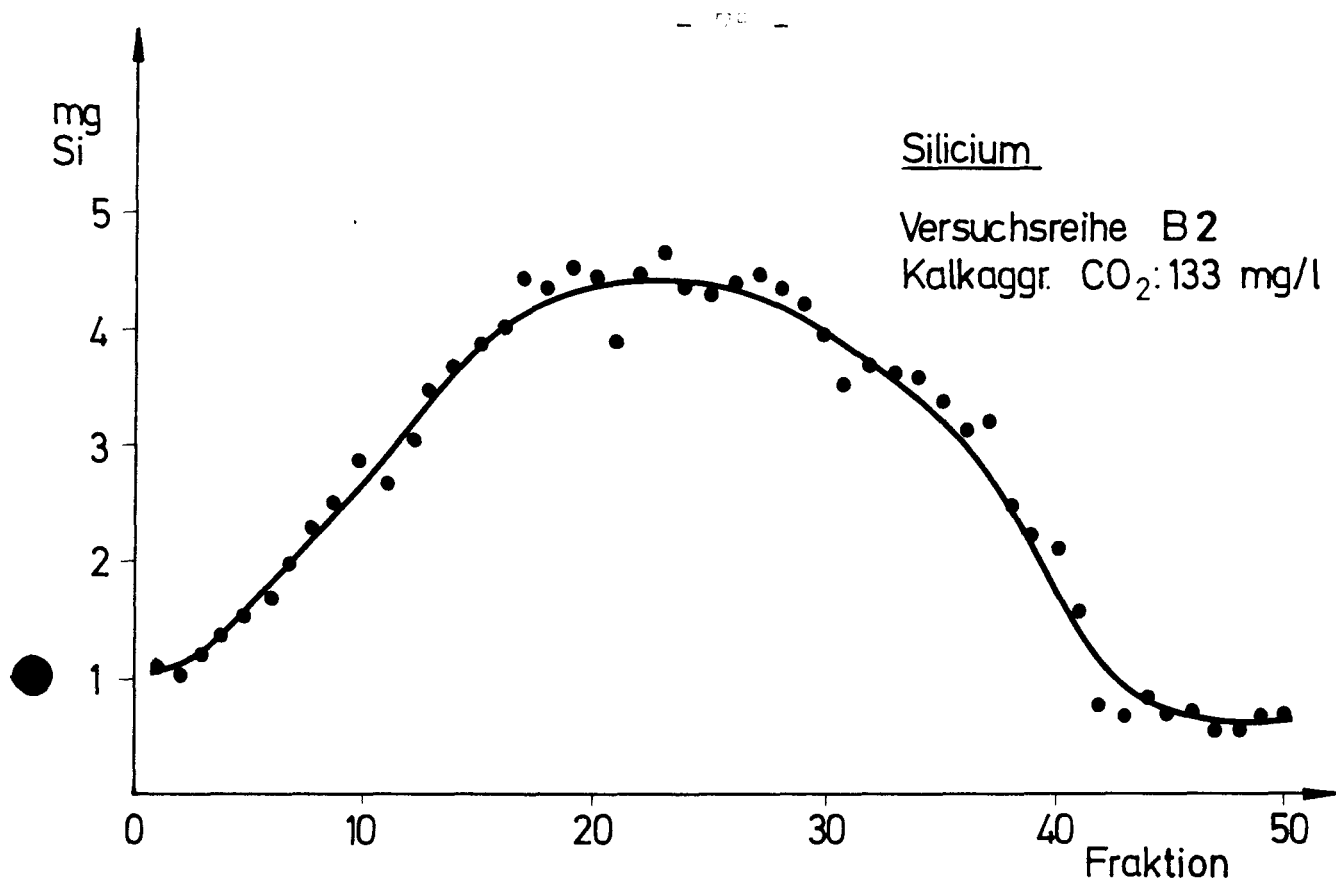


Abb: 20

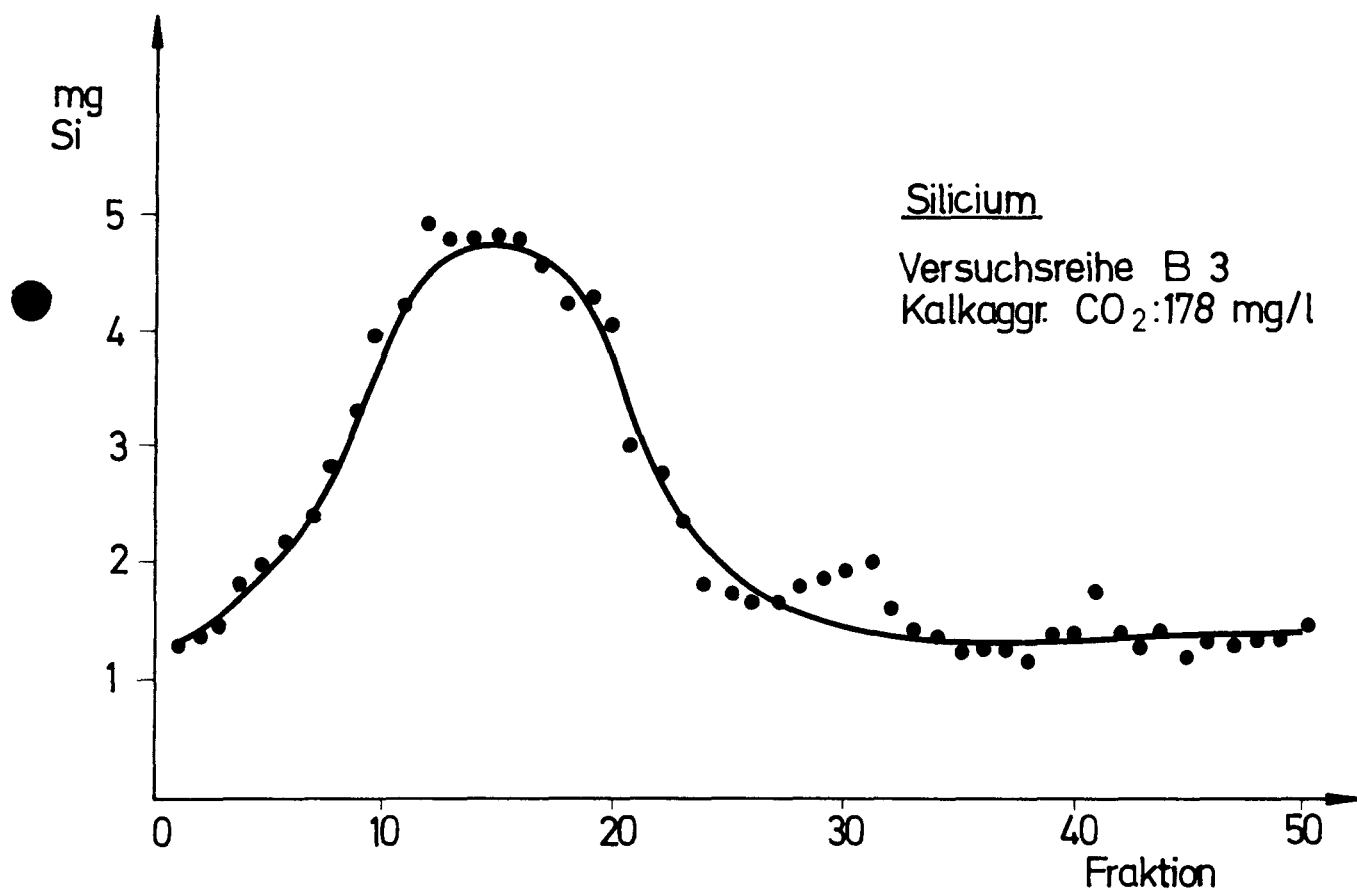


Abb: 21

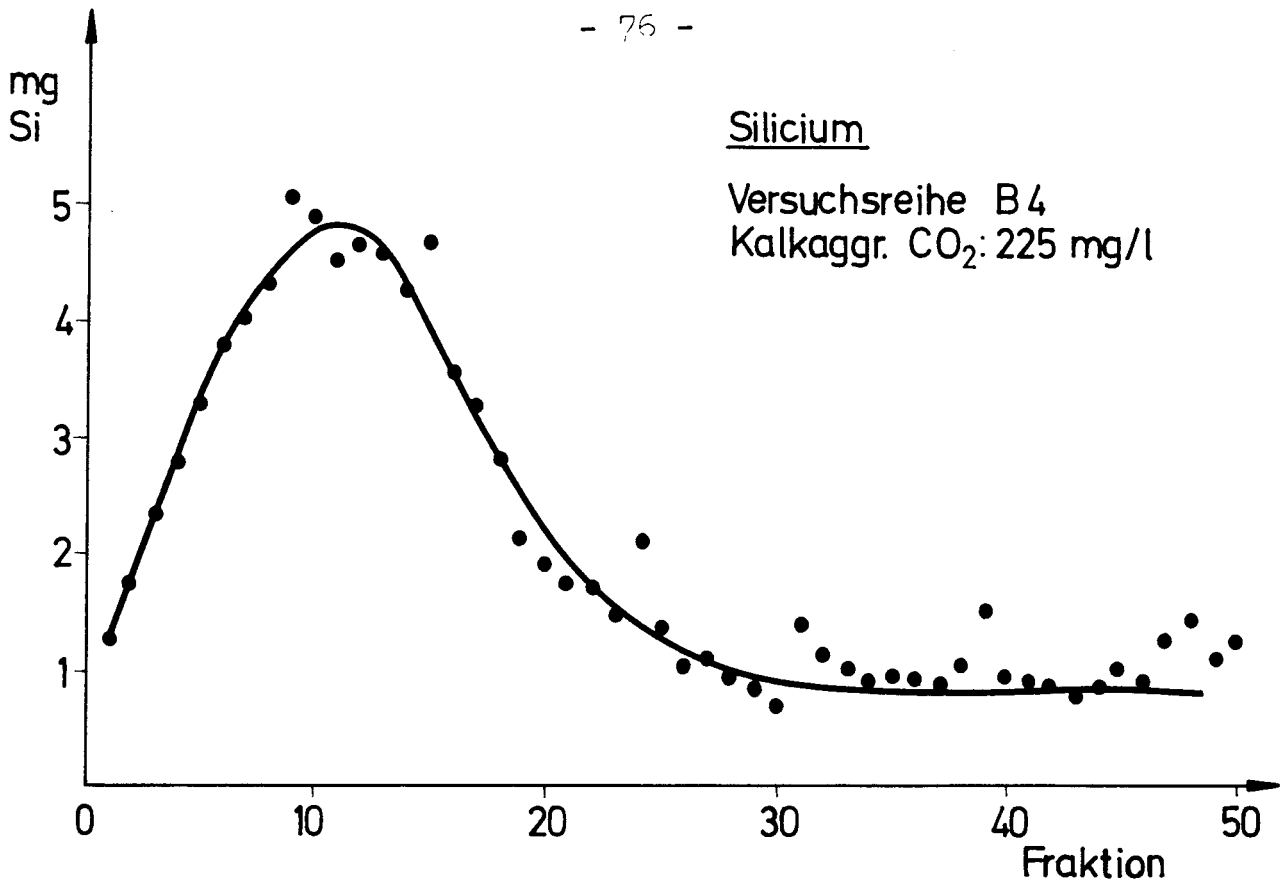


Abb: 22

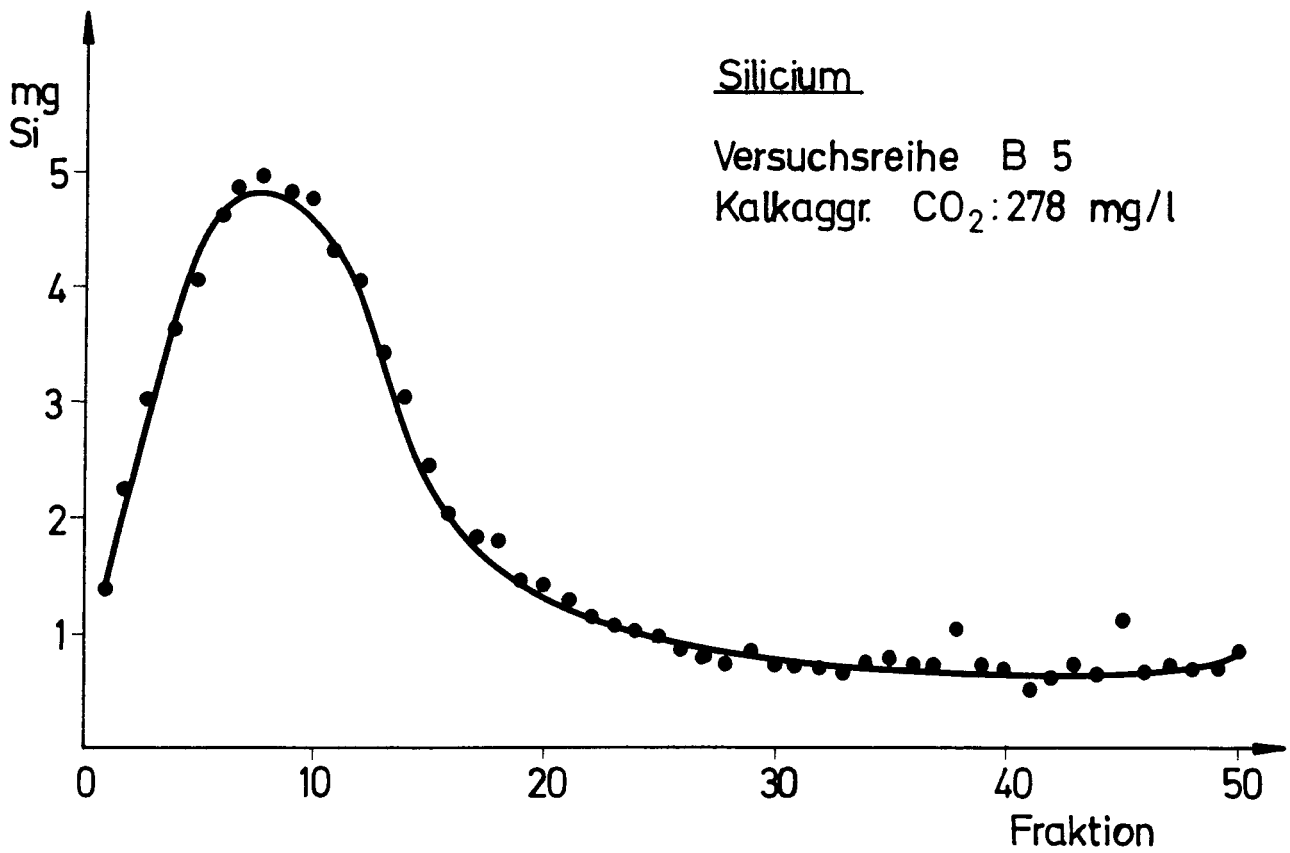


Abb: 23

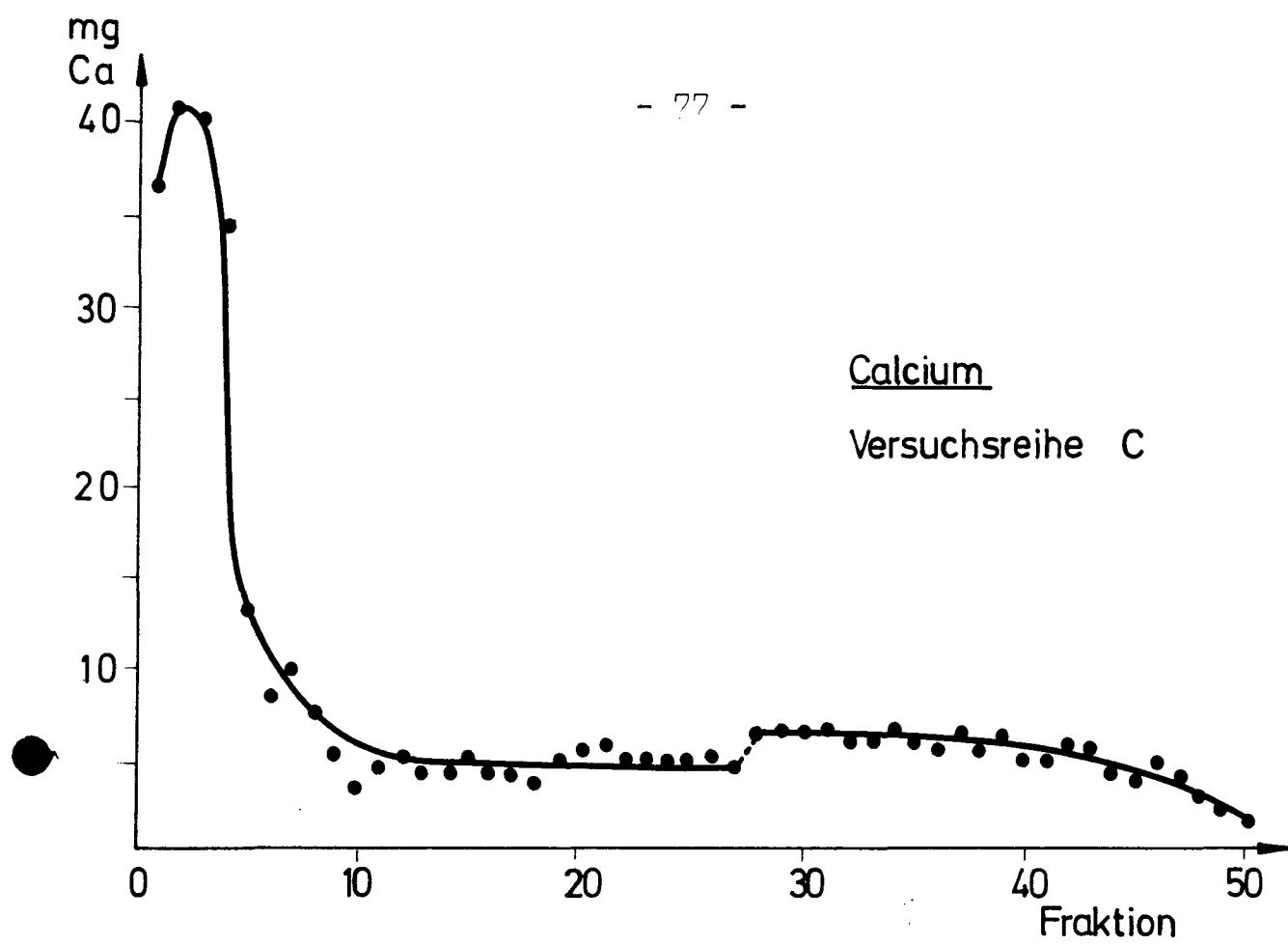


Abb: 24

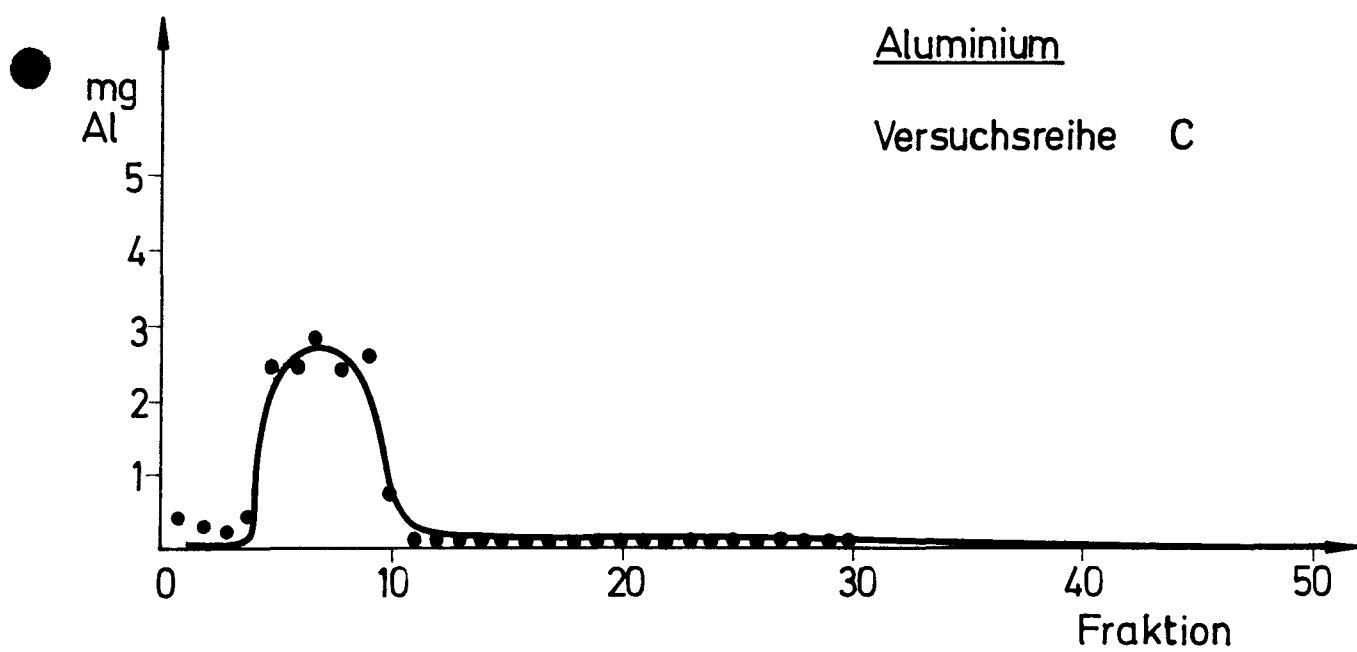


Abb: 25

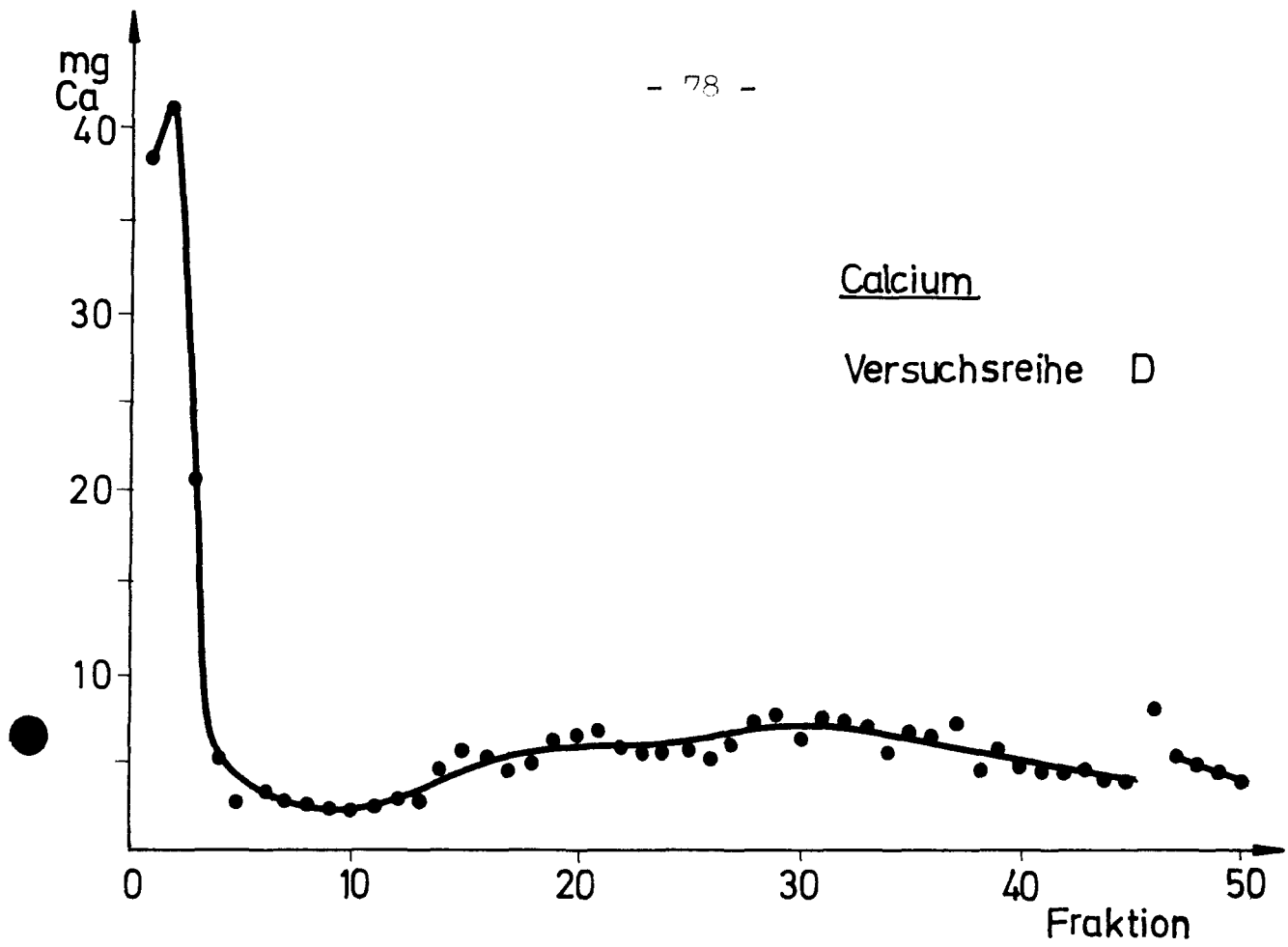


Abb 26

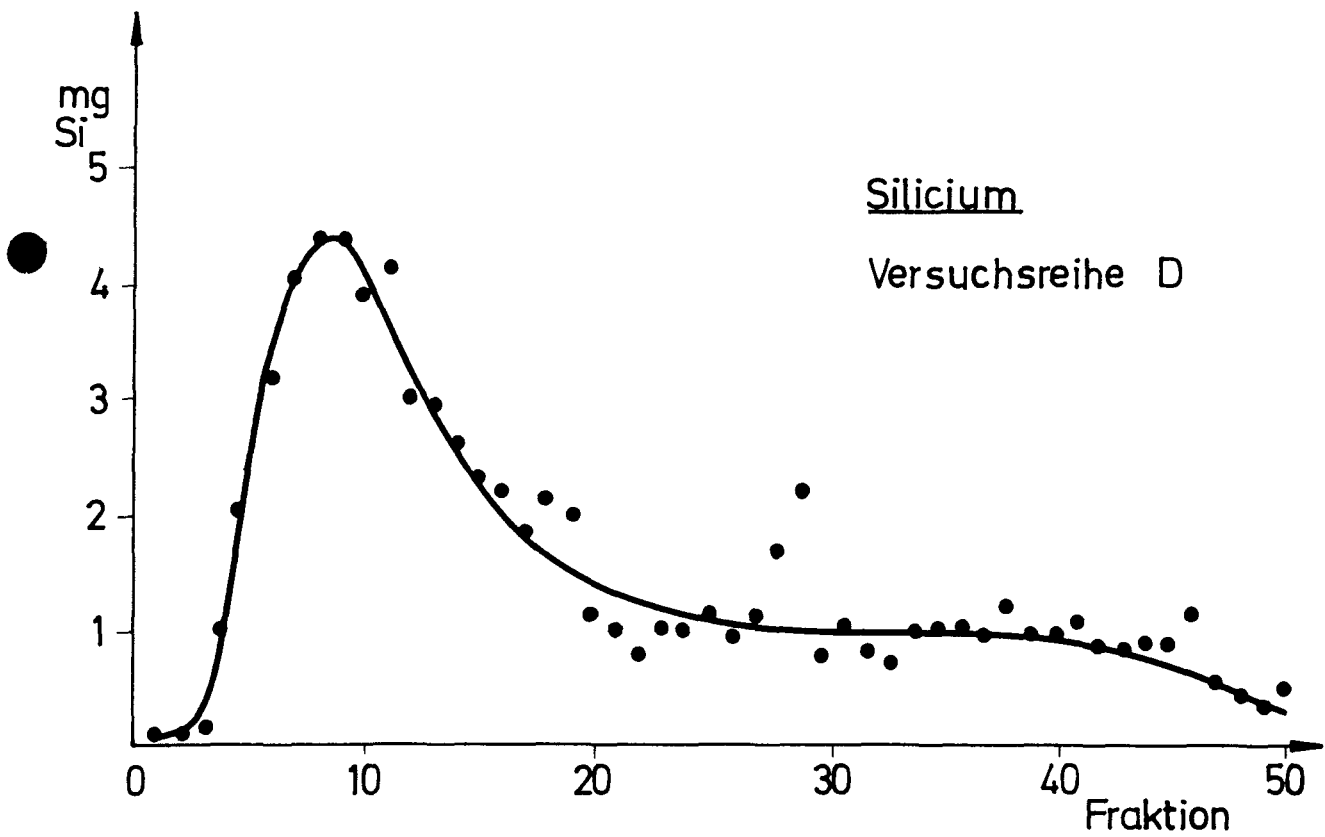


Abb 27

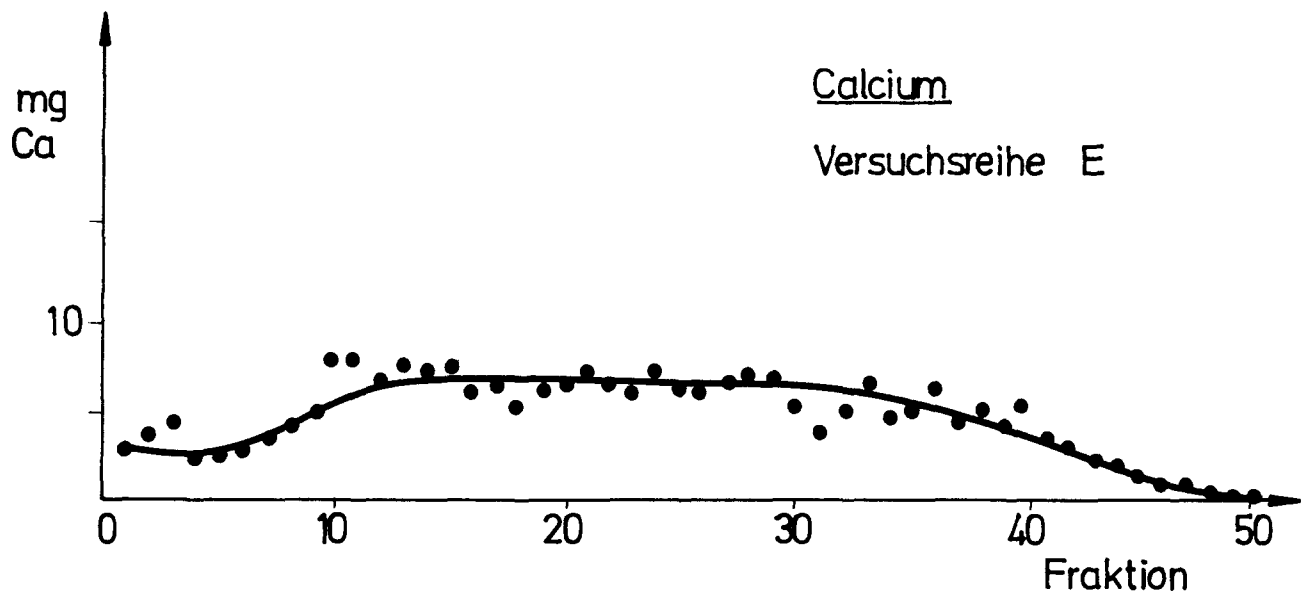


Abb: 28

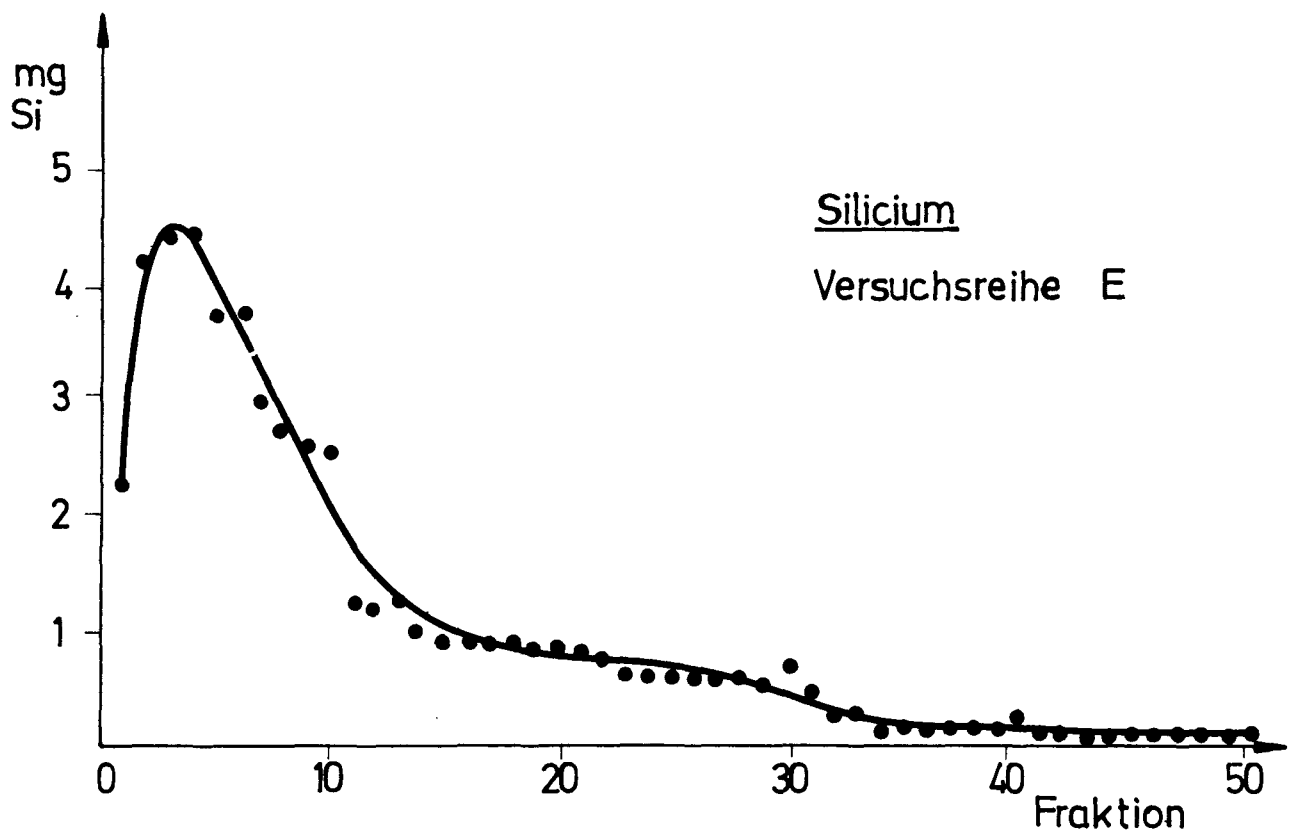


Abb: 29

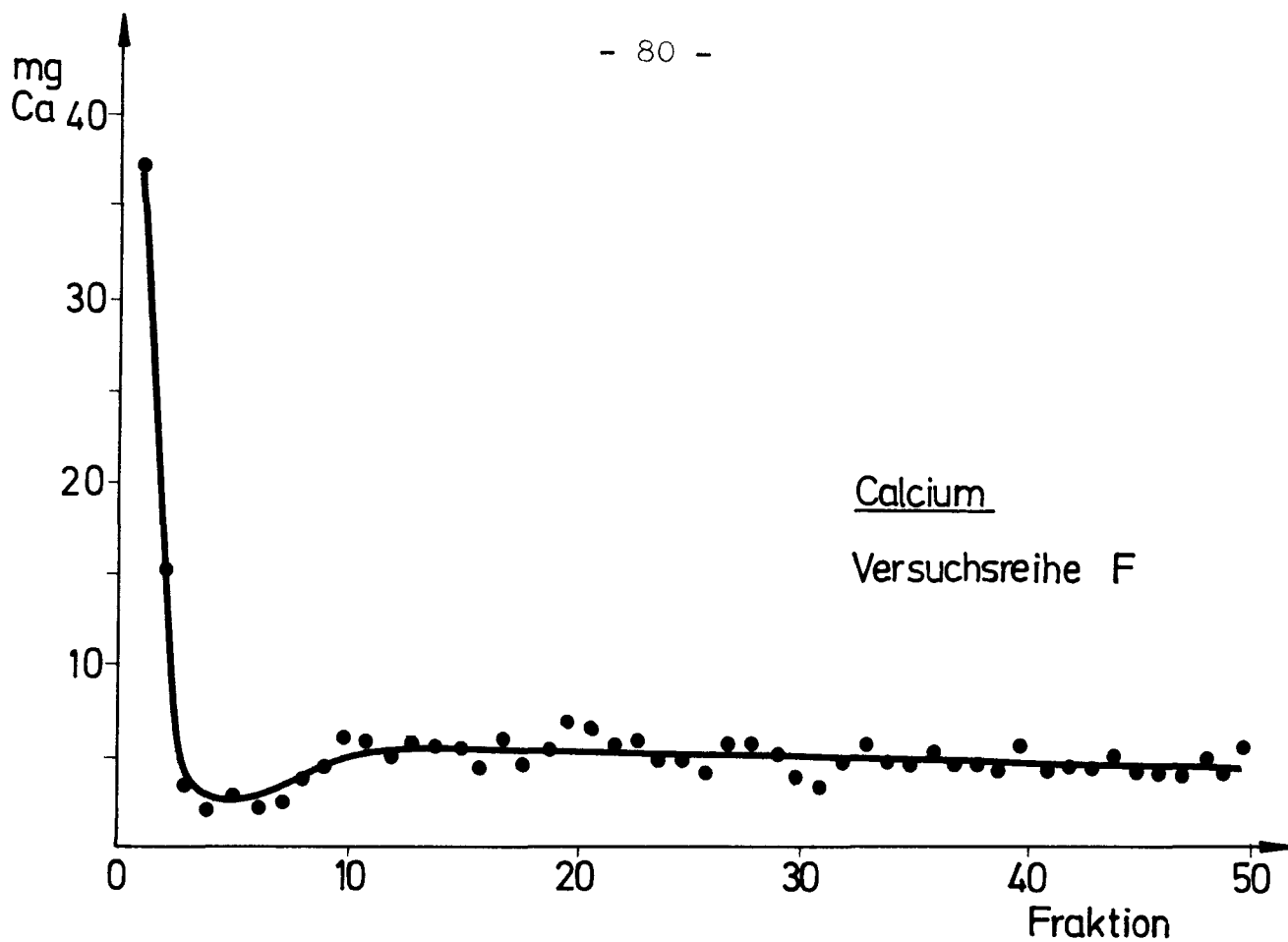


Abb: 30

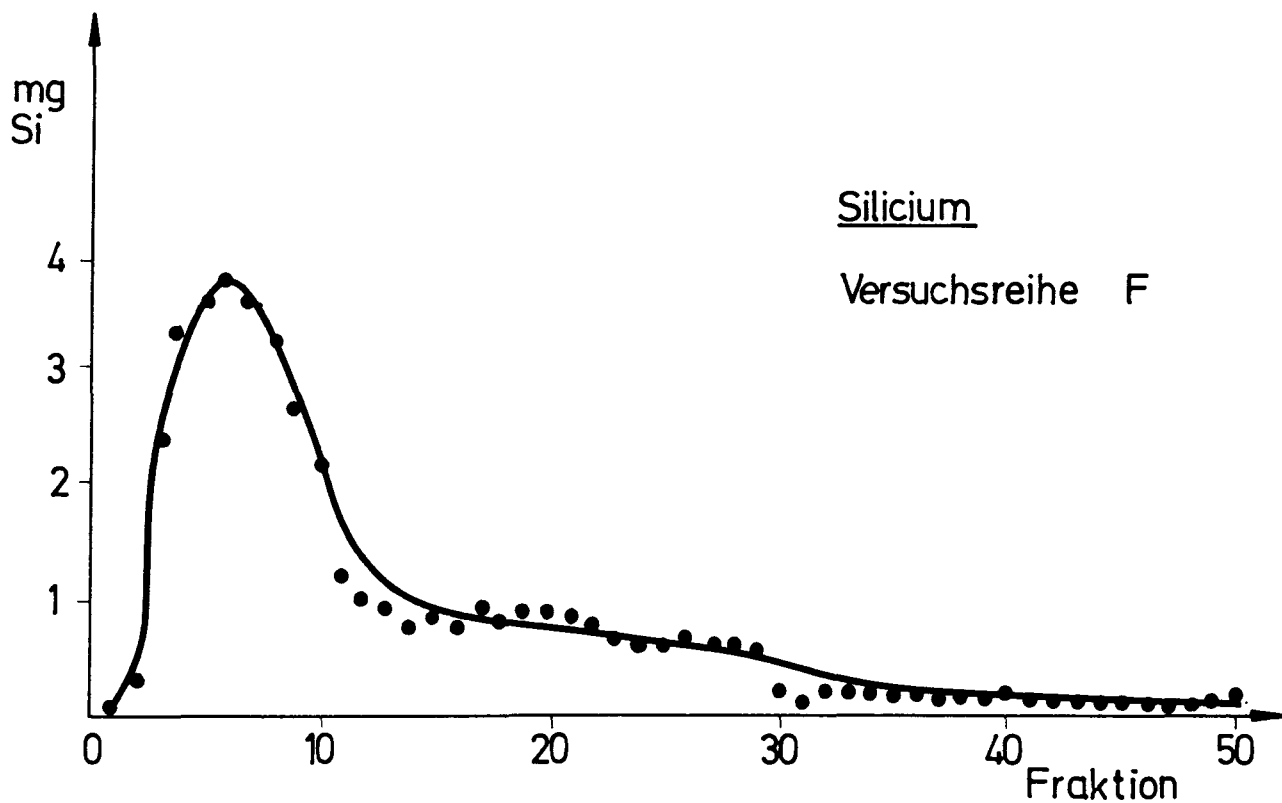


Abb: 31

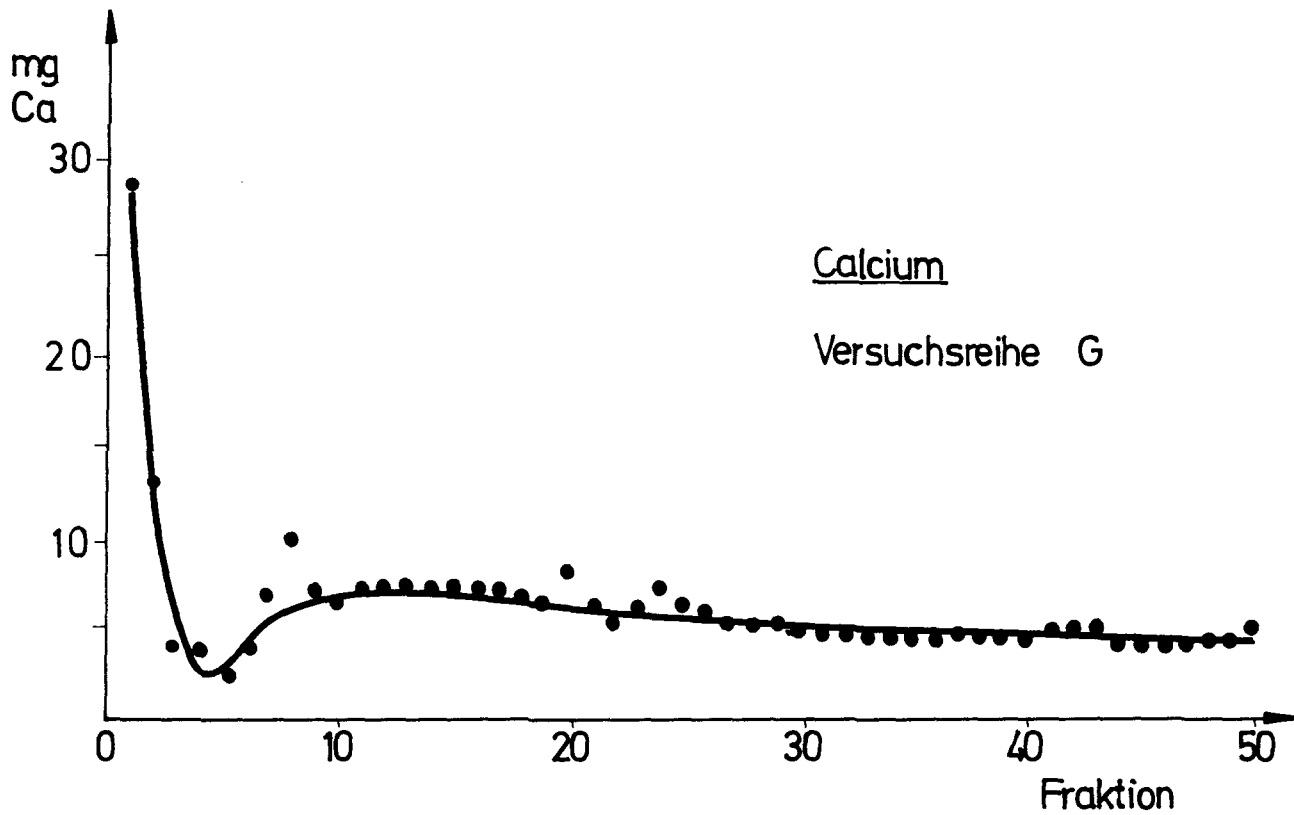


Abb: 32

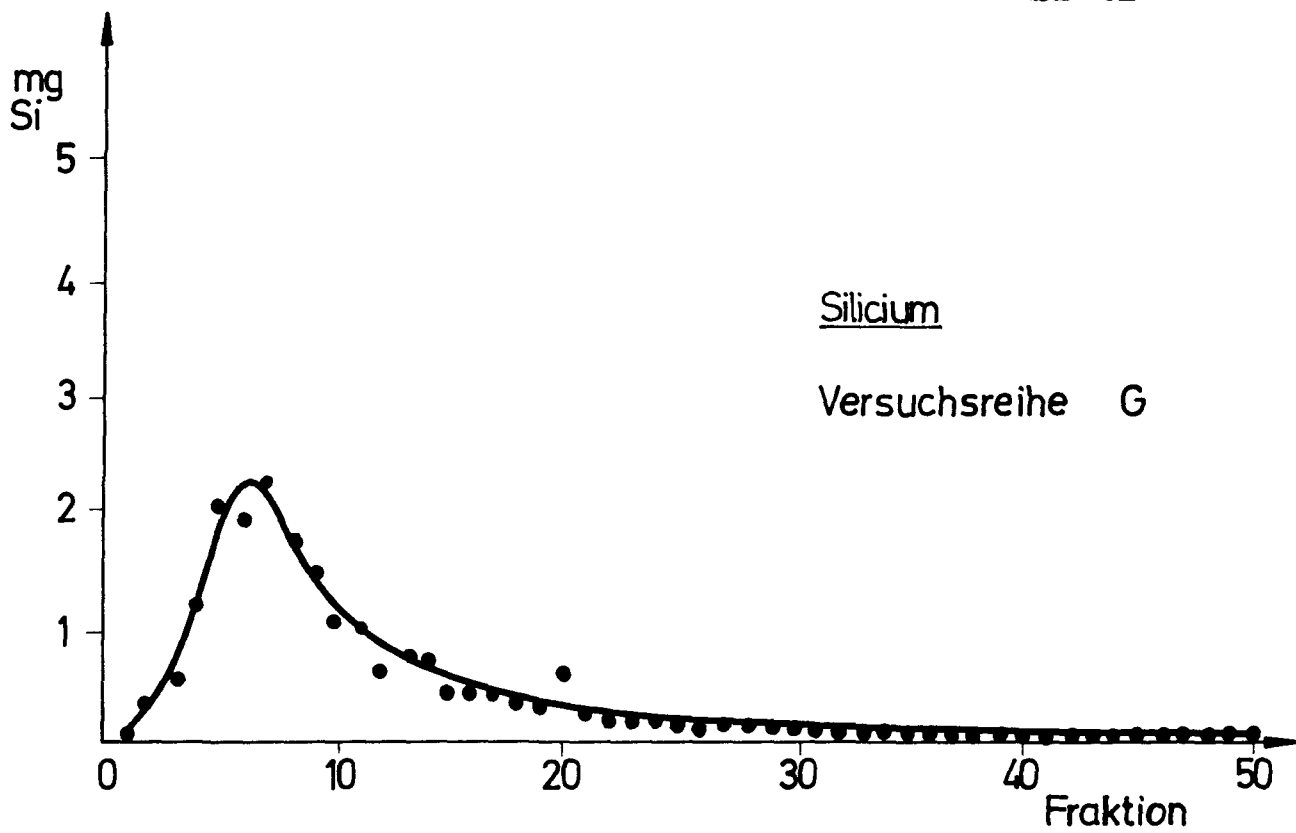


Abb: 33

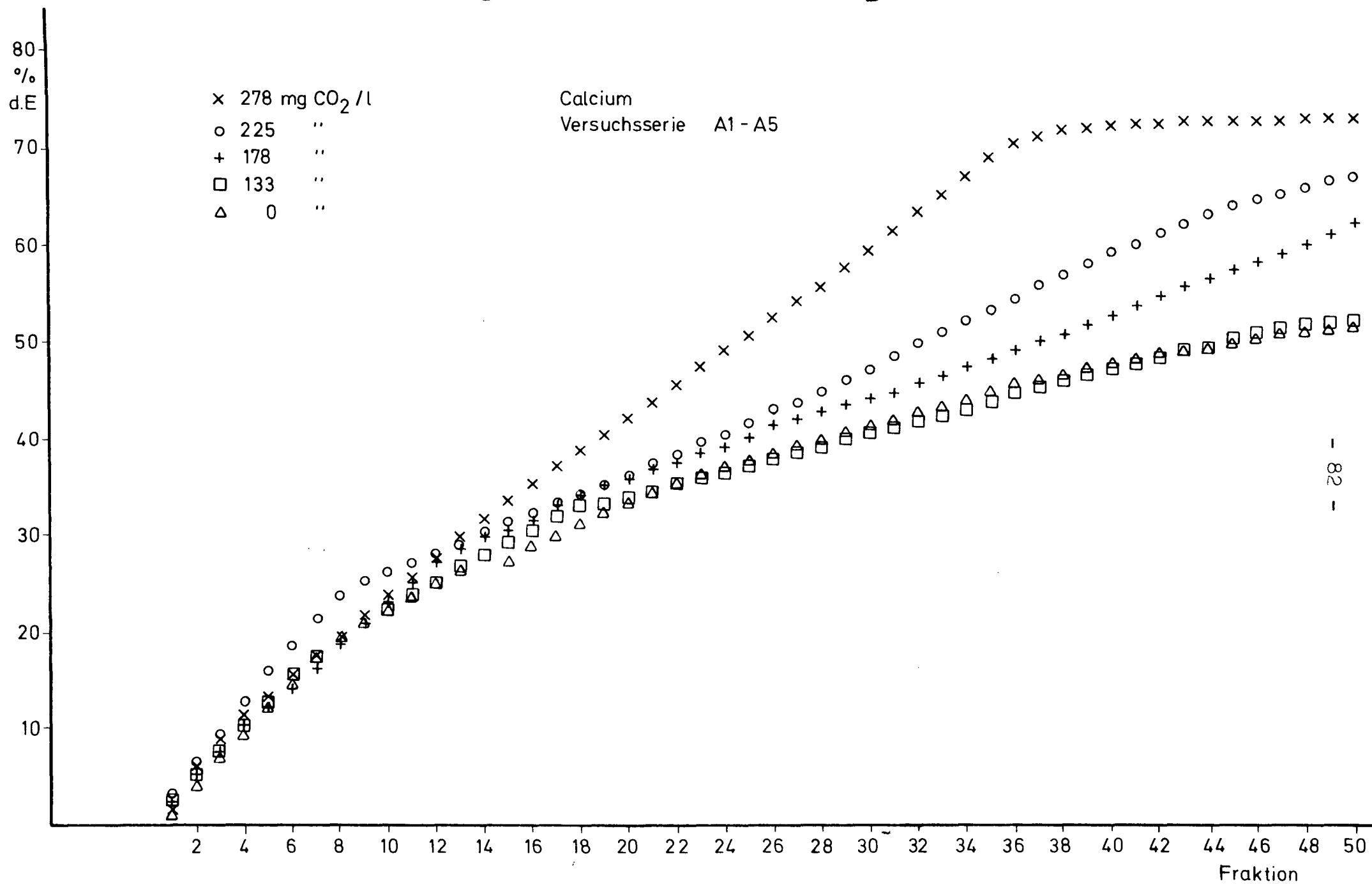


Abb. 34

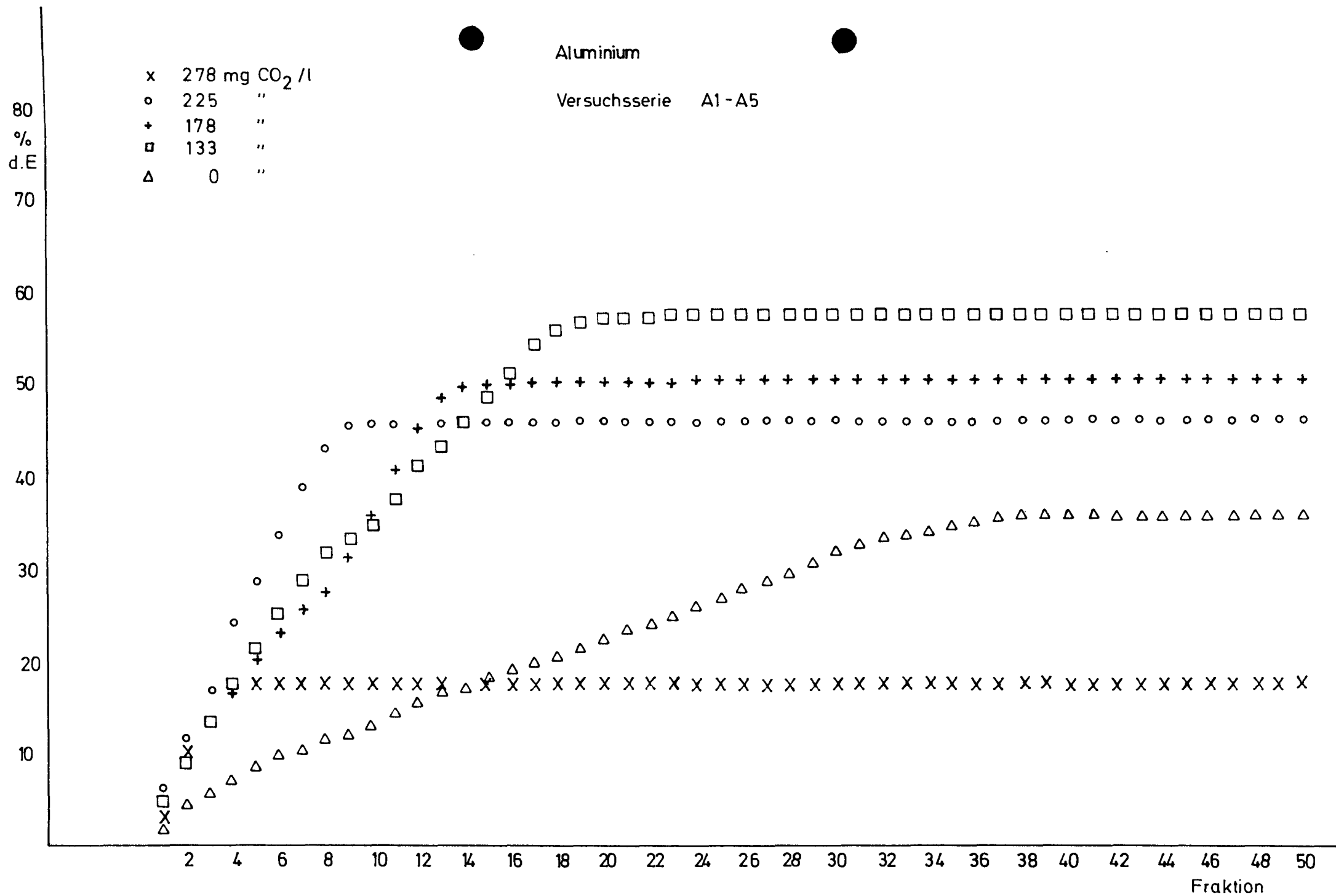


Abb. 35

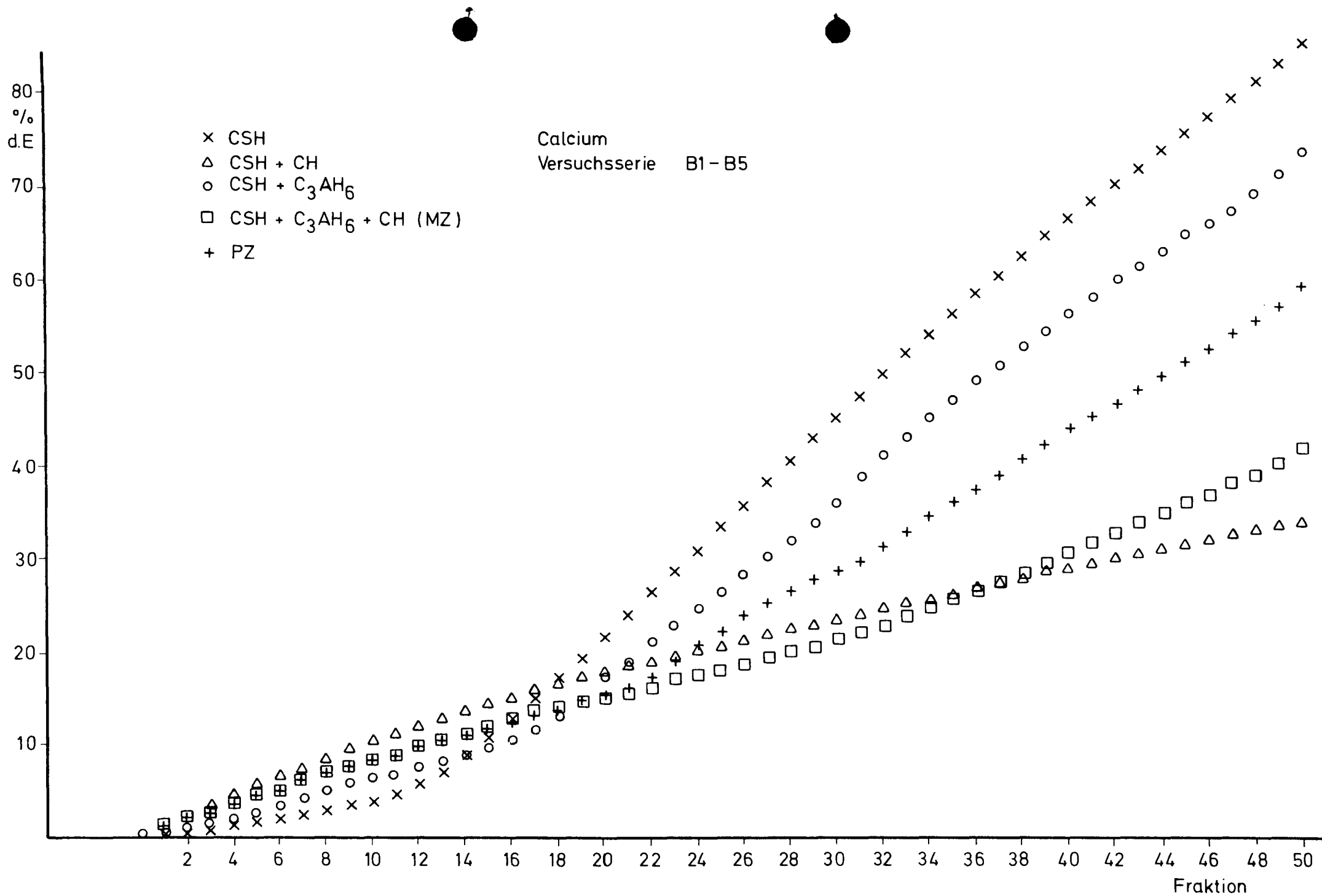


Abb. 36

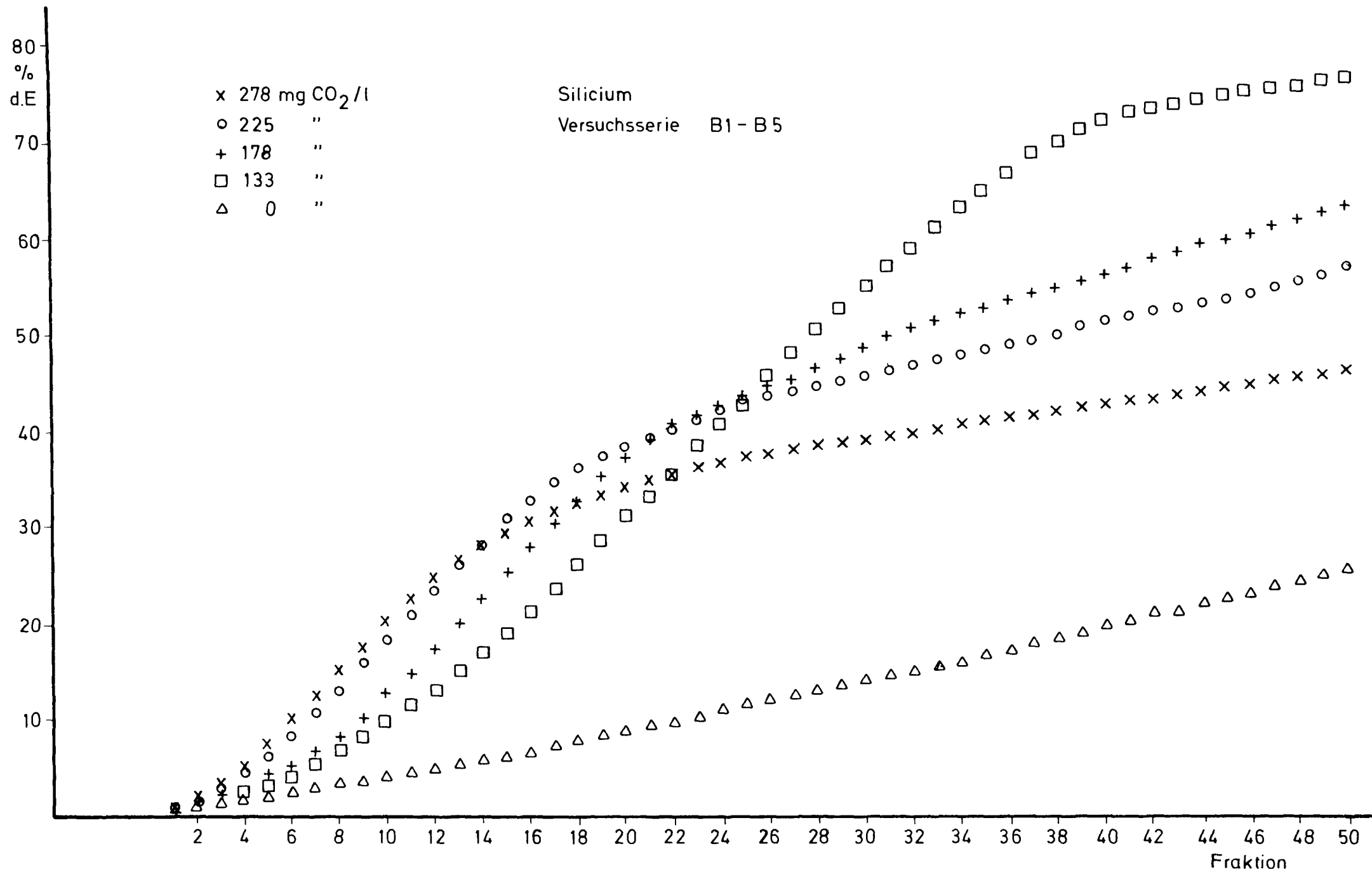


Abb. 37

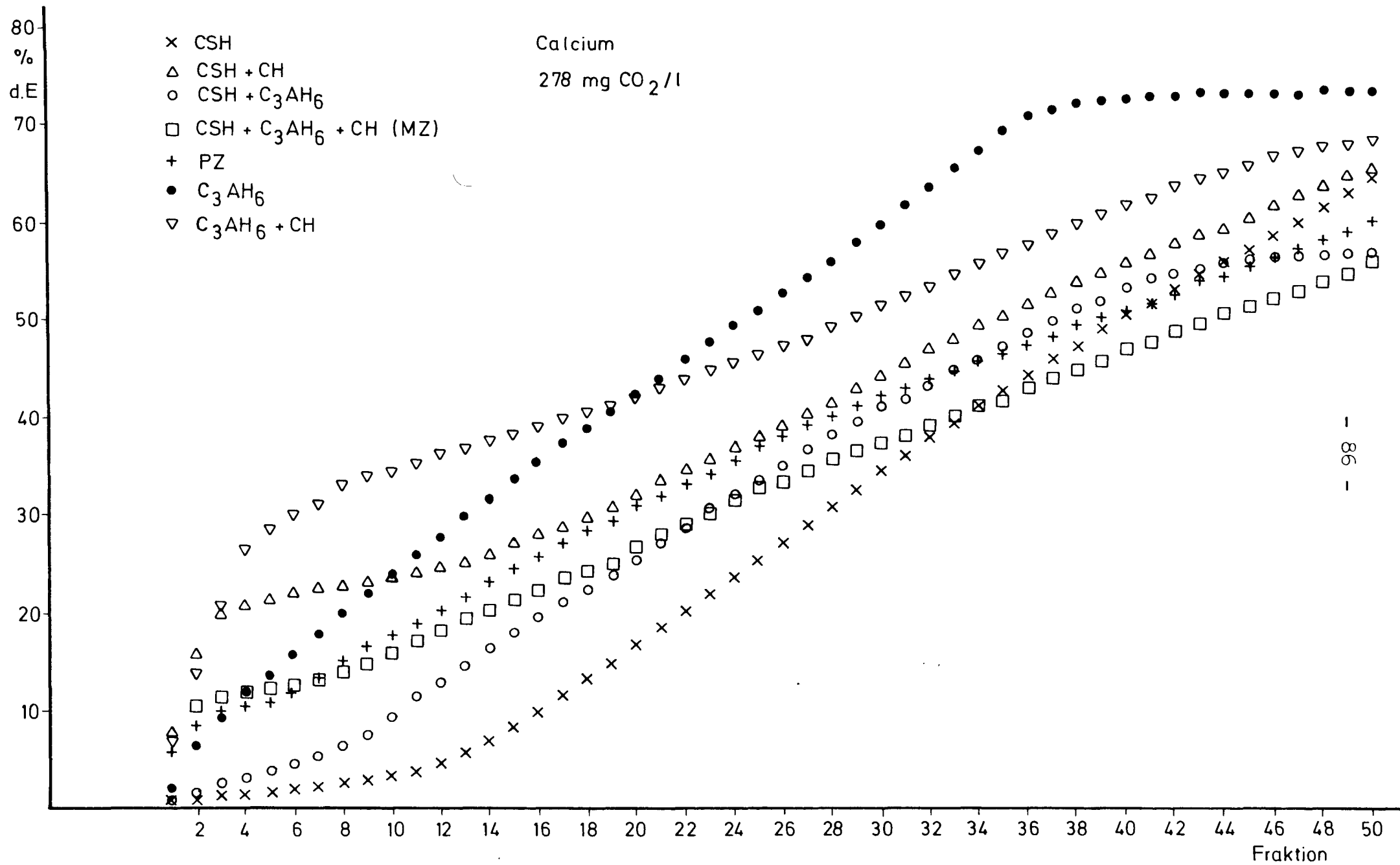


Abb. 38

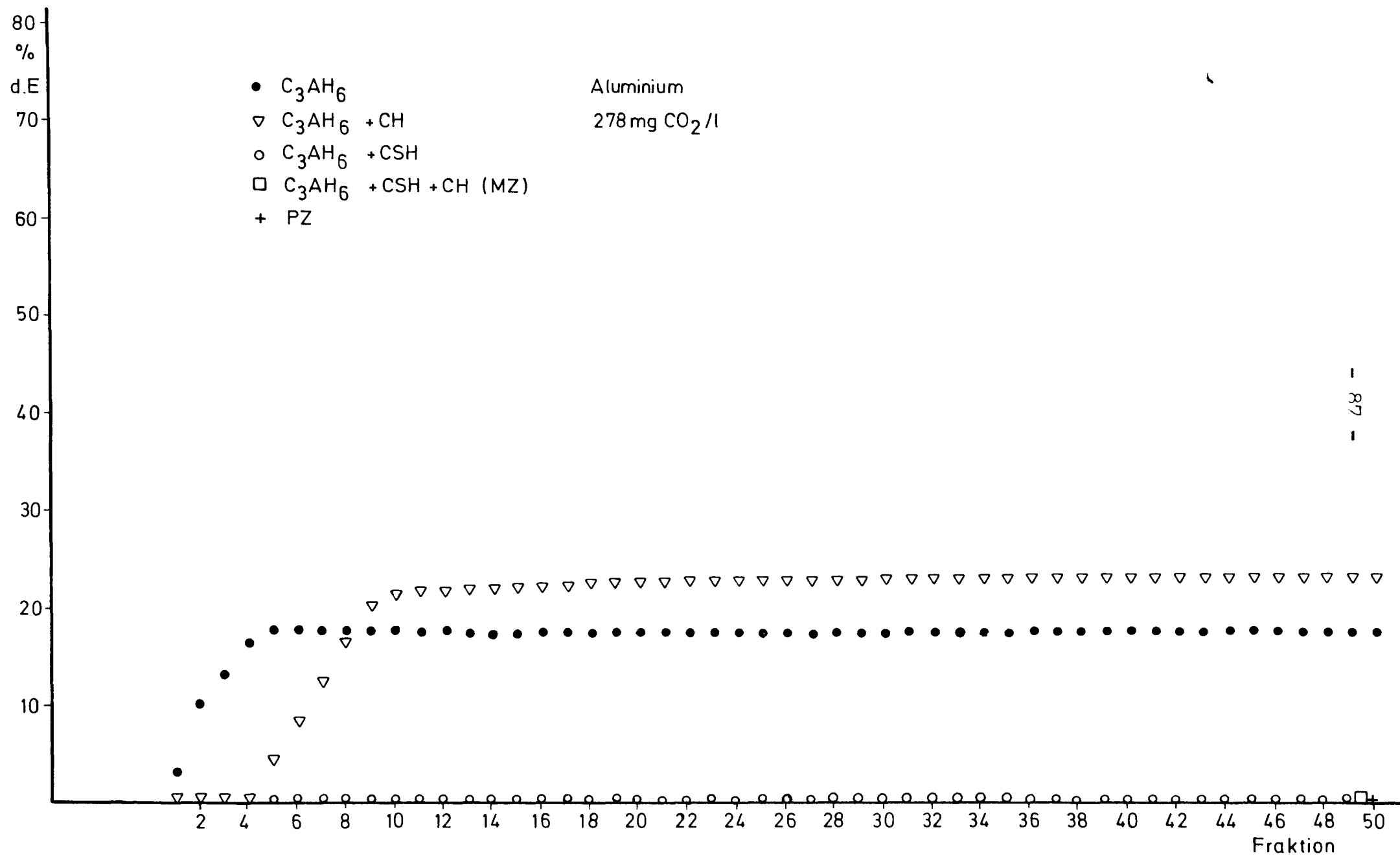


Abb. 39

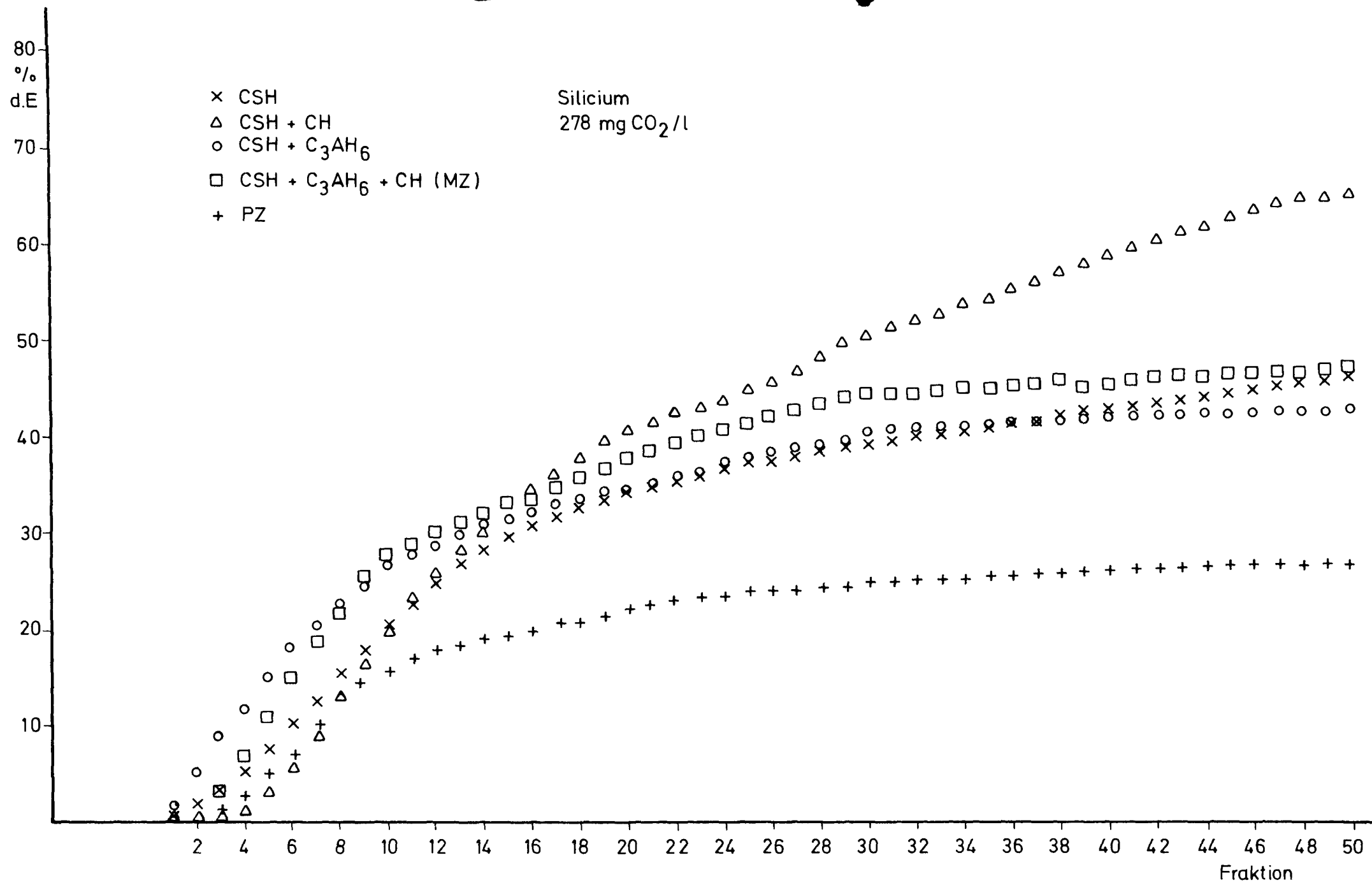


Abb. 40